Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Losgröße und Durchlaufzeit

mittels analytischer Modelle und Simulationsstudien

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Kurt Matyas

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

Dipl.-Ing. Lukas Lingitz

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung, Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Michael Pichler

0425867 (E740)

Flachgasse 49

1150 Wien

Wien, im Mai 2015 _____

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Mai 2015 _____

Danksagung

Mein Dank gilt Ao. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Matyas und Dipl. Ing. Lingitz für die Ermöglichung dieser Arbeit. Ein besonderer Dank gebührt Dipl. Ing. Kamhuber für die tatkräftige Unterstützung bei den Simulationsanwendungen.

Weiters möchte ich mich herzlich bei meinen Eltern bedanken, welche mich mit viel Geduld die gesamte Zeit meines Studiums über kräftig unterstützt haben.

Außerdem gebührt ein großes Dankeschön meinem Schatz Kathrin, welche mich zur Wiederaufnahme des Studiums bewegt hat und mir in den letzten Semestern immer zur Seite gestanden ist.

Ein abschließender Dank geht an all die Freunde und Weggefährten (vor allem an meine langjährigen WG-Kollegen Thomas, Christian, Andi und Dulli) für die vielen erfreulichen und erbaulichen Stunden während der letzten Jahre.

Kurzfassung

In der heutigen Produktionsumgebung wird es zunehmend wichtiger, sich als Unternehmen geschickt am Markt zu positionieren, was unter anderem erfordert, schnell, flexibel und treffsicher auf sich ändernde Kundenanforderungen zu reagieren. Um dies zu erreichen, ist eine straffe und genaue Produktions- und Ablaufplanung notwendig. Dazu zählt unter anderem die Planung der Losgrößen, welche in ihrer Größe, Zusammensetzung und Reihenfolge den Materialfluss in der Produktion wesentlich beeinflussen. Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit dem immer wichtiger werdenden Zusammenhang zwischen den gewählten Fertigungslosgrößen und der Durchlaufzeit eines bzw. mehrerer Aufträge durch die Fertigung. Insbesondere wird hierbei auf die auftretenden stochastischen Einflüsse im Materialfluss und deren Konsequenzen eingegangen. Als Grundlage der meisten Überlegungen dient dabei der Ansatz der Warteschlangentheorie in Verbindung mit dem Gesetz von Little. Die wesentlichen Forschungsergebnisse des theoretischen Teils werden in weiterer Folge anhand einiger einfacher Beispiele interpretiert und mittels Simulationsläufen validiert. Die betrachteten Fertigungsstrukturen wurden mit der Software "Plant Simulation" der Firma technomatrix modelliert. Die Ergebnisse der Untersuchungen waren dabei im Wesentlichen:

- die Darstellung prinzipieller Abhängigkeiten der Bestands-, Leistungs- und Durchlaufzeitgrößen von der Art und Verteilung des Ankunfts- und Bedienprozesses an den einzelnen Arbeitsstationen
- die Veranschaulichung des Effektes der Losgrößenentscheidung auf das Durchlaufverhalten einzelner Aufträge sowie zusammengesetzter Produktportfolios
- die Parametrisierung des Ankunfts- und Bearbeitungsprozesses unter Einbeziehung von Verfügbarkeiten, Wartungsarbeiten etc. ausgehend von Stichproben
- die Feststellung des Einflusses der Losgröße auf die Variabilität des Materialflusses
- eine allgemeinere Formulierung der Gleichungen zur Bestimmung des Effektes überlappter Fertigungsstrukturen (offener Produktionen) auf die mittlere Auftragsdurchlaufzeit
- Die Ermittlung von Produktions- und Prozesskennlinien anhand der beiden analytischen Modellansätze (Kennlinientheorie und Warteschlangentheorie) sowie deren Diskussion und Überprüfung anhand entsprechender Simulationsergebnisse

Die vorliegende Arbeit untersucht somit einige wesentliche Aspekte des Materialflusses und deren vielfältige Beeinflussung durch die gewählte Fertigungslosgröße, welche in den bisherigen Planungs- und Steuerungsverfahren zumeist noch ungenügend berücksichtigt werden.

Abstract

Because of increased market dynamics, producing companies are forced to position themselves intelligently in the market. In this context, the ability to react quickly, flexible and accurately to the costumers changing demands is very important. In order to achieve this, a firm and precise production planning, - scheduling and - control is required. This involves - among other issues - the planning of lot sizes, which have a severe impact on the flow of materials through the production process.

Therefore this thesis tries to explain the main correlations between the chosen batch sizes and the cycle time of one or many job(s) through a work station or production line. Particularly it pays attention to the multiple effects of stochastic processes and their consequences. The theoretical basis of most of the considerations is given by the Queuing Theory and Little´s Law.

The results of the theoretical examinations are then interpreted with the help of several simple examples as well as validated by many simulation runs using the modeling - software "plant simulation" from technomatrix.

The main results are

- the exposure of principal interdependencies of the characteristic key data, such as work in progress, utilization, and cycle time
- the demonstration of the effects on the material flow of single jobs as well as product- mixes caused by batching decisions
- the parametrization of the stochastic arrival - and treatment processes including availability, setup procedures etc. using samples
- the identification of the influence of batching on the variability of material flows
- a more general formulation of the equations to determine the effect of overlapping
- an investigation and discussion of the two approaches to develop the characteristic curves for a production system (Produktions- und Prozesskennlinien)

Summing up, this paper examines some key aspects of the flow of materials in a production environment and the multiple impacts of batching decisions.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3
1.1 Kundenanforderungen - externe Zielgrößen 3
1.2 Anforderungen an die Fertigung - interne Zielgrößen 4
1.3 Das Dilemma der Ablaufplanung 6
1.4 Aufgabenstellung und Zielsetzung 7
1.5 Struktur der Arbeit 8
2 Grundlagen der Modellierung 10
2.1 Modellabgrenzung 10
2.2 Begriffsdefinitionen 14
2.3 Grundmodelle der logistischen Planung 23
2.4 Produktionskennlinien 31
2.5 Zusammenfassung der Theorie aus Kapitel 2 45
3 Modellierung des Materialflusses durch Wartesysteme 47
3.1 Grundlagen 47
3.2 Die Ursache für Warteschlangen - Variabilität 48
3.3 Variabilität im Materialfluss 49
3.4 Parameter eines Warteschlangensystems 50
3.5 Berechnung der Leistungskennzahlen 58
3.6 Notation der Warteschlangenmodelle 59
3.7 Überblick über die wichtigsten Modelle 60
3.8 Warteschlangennetzwerke 64
3.9 Zusammenfassung der Theorie aus Kapitel 4 68
4 Loseffekte 70
4.1 Lose im Prozessablauf 70
4.2 Einfluss der Prozesslosgröße 72
4.3 Losfertigung an einer Arbeitsstation - Zusammenfassung 81
4.4 Ausweitung des Modells auf Mehrproduktfälle 81
4.5 Losfertigung in einer Produktionslinie 92
4.6 Zusammenfassung der Theorie aus Kapitel 4 100

5 Praktischer Teil - Simulation 104
5.1 Ablauf einer Simulationsstudie 104
5.2 Grundlagen des verwendeten Simulationsmodells 105
5.3 Beispiel 1: einzelner Arbeitsplatz, gleichartige Aufträge 106
5.4 Beispiel 2 - eine Arbeitsstation - mehrere unterschiedliche Aufträge 129
5.5 Beispiel 3 - gleichartige Aufträge - mehrere Stationen 148
5.6 Beispiel 4 - mehrere Produkte - mehrere Stationen 154
5.7 Auswertung der Untersuchungsergebnisse 168
6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick 170
7 Anhang 173
7.1 Anhang Beispiel 1 174
7.2 Anhang Beispiel 2 175
7.3 Anhang Beispiel 3 177
7.4 Anhang Beispiel 4 178
8 Literaturverzeichnis 181
9 Abbildungsverzeichnis 187
10 Formelverzeichnis 190
11 Tabellenverzeichnis 194
12 Abkürzungsverzeichnis 196

1 Einleitung

Der Kunde bestimmt mit seinen Anforderungen über die Art und Weise, wie Produkte am Markt angeboten werden müssen. Ein Produktionsunternehmen muss daher immer flexibel bleiben, um sich den Wünschen und Forderungen des Nachfragemarktes möglichst schnell und effizient anpassen zu können. Der Erfolg eines Produkts hängt oftmals davon ab, zu welchem Zeitpunkt (möglichst bald) und in welchem Zustand (möglichst nahe am Kundenwunsch) es auf den Markt gebracht wird. Das bedeutet, dass Produkte sowie die dazugehörigen Prozesse schnell, ständig und effizient aufgewertet werden müssen, um sich einen dauerhaften Wettbewerbsvorteil gegenüber der Konkurrenz verschaffen zu können.[1]

In den folgenden einleitenden Abschnitten wird die aktuelle Marktsituation dargestellt, welche die logistische sowie die Produktionsplanung eines Unternehmens durch ihre Anforderungen steuert. Da dieses Thema großteils bekannt ist und schon vielfach behandelt wurde, sollen nur kurz die für die vorliegende Arbeit relevanten Begriffsdefinitionen und Zusammenhänge herausgearbeitet werden. In den Abschnitten 1.4 und 1.5 erfolgt zudem ein Überblick über die wesentlichen Fragestellungen sowie die Strukturierung der vorliegenden Arbeit.

1.1 Kundenanforderungen - externe Zielgrößen

Die heutige Marktsituation zeichnet sich vor allem durch eine sehr starke Kundenorientierung aus. Oftmals wird in diesem Zusammenhang von einem "Wandel vom Verkäufer - zum Käufermarkt" gesprochen. Wurde vor 70 Jahren noch großteils das gekauft, was gerade am Markt angeboten wurde, so besitzt der Kunde heute aufgrund des großen Angebots eine weitaus stärkere Machtposition, welche sich durch klar formulierte Forderungen, denen die produzierenden Unternehmen entsprechen müssen, ausdrückt. Dabei haben sich in den letzten Jahren -neben Preis und Produktqualität - die Liefertreue und die Lieferzeit als Auswahlkriterium immer stärker etabliert.[2] Die Siemens AG führte dazu eine Umfrage durch, deren Ergebnis in Abbildung 1 dargestellt ist.

Die Lieferzeit definiert sich dabei als "die Zeitdauer zwischen dem Auftragseingang und der Auslieferung des Auftrags"[3]. Die Terminabweichung bezeichnet die Differenz zwischen tatsächlichem und dem geplantem Termin der Auslieferung. [4] Für diese Abweichung wird zumeist ein Toleranzrahmen zwischen Lieferant und Kunden festgesetzt. Alle Aufträge mit einer Terminabweichung kleiner oder gleich der Toleranz sind demnach pünktlich. Die

[1] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 2
[2] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 2
[3] Lödding, 2008, S. 20
[4] Lödding, 2008, S. 20

Liefertreue schließlich beschreibt den prozentuellen Anteil der innerhalb der Liefertermintoleranz gelieferten Aufträge. [5]

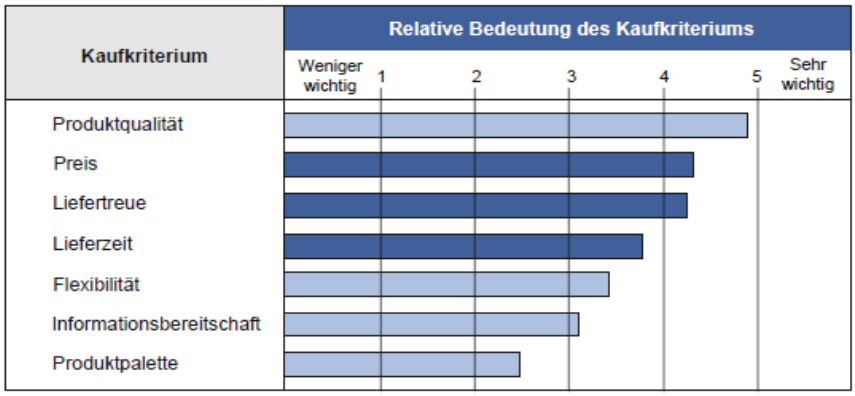


Abbildung 1: Kriterien für den Kauf von Produkten[6]

Nicht zu vergessen sind allerdings auch die Kunden innerhalb des Unternehmens. Diese sind zumeist die Eigentümer bzw. die Unternehmensleitung, welche die Wirtschaftlichkeit der Fertigung bzw. Produktion sowie die Gewinnmaximierung innerhalb des Unternehmens zum Ziel haben. Diese Ziele können primär durch hohe Auslastung (geringe Stillstandzeiten der Maschinen) sowie niedrige Bestände (wenig gebundenes Kapital, geringe Transport- und Lagerkosten) erreicht werden. [7] Das folgende Bild liefert einen Überblick über die verschiedenen Anforderungen an eine Produktion:

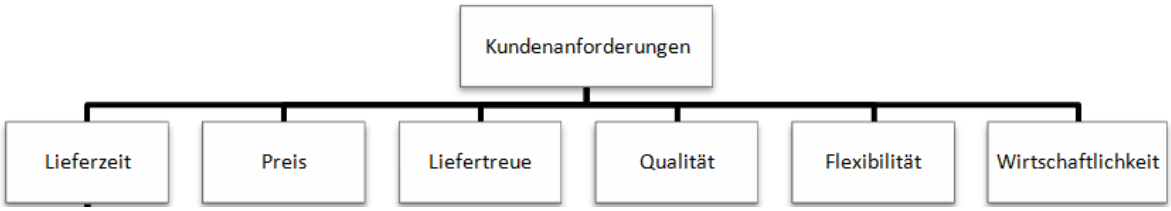


Abbildung 2: Kundenanforderungen

1.2 Anforderungen an die Fertigung - interne Zielgrößen

Aus den oben erläuterten Kundenanforderungen lassen sich interne, messbare Zielgrößen für den Fertigungsprozess ableiten. Sie lassen sich grob in die Überbegriffe "Logistikleistung" und "Logistikkosten" einteilen, deren Interdependenzen folgendermaßen dargestellt werden können (siehe Abb. 3).[8] Dabei sind jene Größen, die der Logistikleistung zugeordnet sind, dem externen Kunden, also dem Nachfragemarkt, wichtig, während die Logistikkosten vor allem für die Unternehmensleitung von großer Bedeutung sind. Jedoch sind beide Kategorien zumeist eng miteinander verwoben und müssen im Falle einer Bewertung

[5] Bornhäuser, 2009, S. 42 ff.
[6] Quelle: Siemens AG, in Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 2
[7] Wiendahl, 2010, S. 253
[8] Lödding, 2008, S. 19

gemeinsam betrachtet werden.[9] So hängt beispielsweise die Lieferzeit eines Produktes (unter anderem) direkt mit der Durchlaufzeit eines Auftrages durch die Fertigung zusammen. Der Preis des Produktes wird vor allem durch die Herstellkosten bestimmt, welche wiederum sehr eng mit der Durchlaufzeit verbunden sind.

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

Abbildung 3: interne und externe Zielgrößen[10]

Bei der Bewertung der Produktionskosten kann eine grobe Unterscheidung zwischen kapazitätskostenintensiven Produktionsstrukturen (Massenfertigung, Kleinteile), in denen vor allem hohe Lohn- und Maschinensätze zu hohen Kosten führen, und umlaufkostenintensiven Produktionsstrukturen (Maschinenbau, Anlagenbau), in denen die Liegezeiten der Zwischenprodukte und damit ihre Durchlaufzeit den Großteil der Kosten ausmachen, vorgenommen werden[11]. Abbildung 4 veranschaulicht diese Unterteilung:

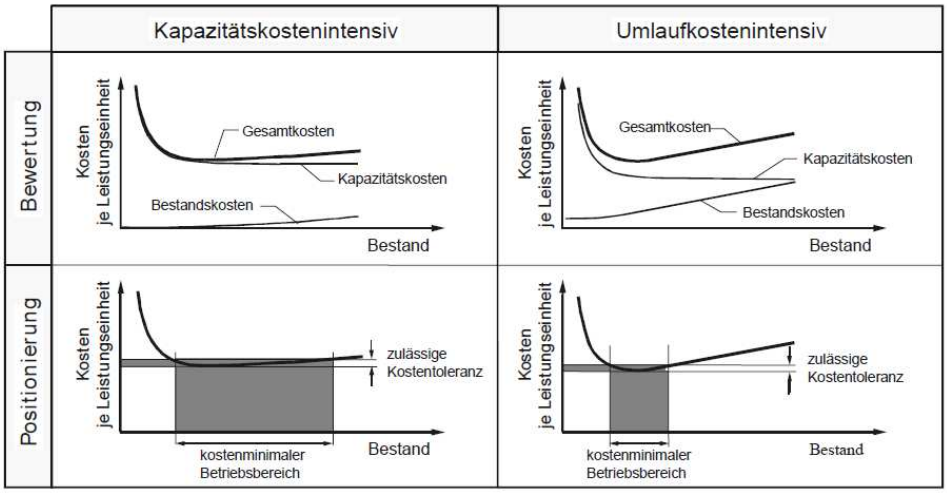


Abbildung 4: Positionierung aufgrund der Kostenstruktur [12]

[9] Lödding, 2008, S. 19 ff.
[10] Lödding, 2008, S. 19
[11] Kerner, 2002, S. 44
[12] Quelle: Kerner, 2002, S. 44

Zu der Gruppe der umlaufkostenintensiven Produktionsstrukturen zählen auch Einzel- und Kleinserienfertigung in nach dem Werkstattprinzip organisierten Produktionen. Bei ihnen kommt der Losgrößenplanung im Zuge der Durchlaufzeitbestimmung daher große Bedeutung zu, da die Fertigungsaufträge um Kapazitäten an den Arbeitsstationen konkurrieren, was bei hoher Auslastung zu großen Warteschlangen führt und die Auftragsdurchlaufzeiten empfindlich ansteigen lässt. Beispiele für solche Produktionen sind Maschinenbauunternehmen für Investitionsgüter sowie in Betrieben der Elektrotechnik, der Elektronik und der Kraftfahrzeug-Zulieferindustrie.[13]

1.3 Das Dilemma der Ablaufplanung

Das Ziel der Produktionsplanung bzw. der Fertigungssteuerung besteht nun darin, die Prozesse innerhalb des Unternehmens so zu lenken, dass sich die Erreichung der diversen Zielgrößen nachhaltig verbessert. Jedoch stößt man dabei schon bald auf ein Problem: Die Zielgrößen konkurrieren miteinander.[14] Betrachtet man die vier zentralen Größen, also Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue, so wird diese Konkurrenz anhand eines Szenarios sehr rasch ersichtlich:

Verringert man den Bestand innerhalb des Produktionsprozesses, so wird sich die Durchlaufzeit auch verringern, was sich beides positiv auswirkt (niedrige Lagerkosten sowie kurze Lieferzeit). Jedoch sinkt gleichzeitig auch die Auslastung der Arbeitsstationen, was einen negativen Effekt darstellt (Wirtschaftlichkeit sinkt). Erhöht man nun wieder die Auslastung (geringere Stillstandskosten), so wird sich damit auch der Bestand erhöhen. Mit steigendem Bestand steigt auch der Mittelwert und die Streuung der Durchlaufzeit, was sich negativ auf die Termintreue auswirkt.[15] Diese Konkurrenz zwischen den Zielen "niedriger Bestand", "hohe Auslastung", "kurze Durchlaufzeit" und "hohe Termintreue" wird in der Literatur als "Dilemma der Ablaufplanung" bezeichnet.[16] Dargestellt werden kann dieser Zustand als "Zielkreuz der produktionslogistischen Zielgrößen" (Abbildung 5).

Bei der Ergreifung von Maßnahmen zur Optimierung eines Wertes müssen also auch die Auswirkungen auf die anderen Zielgrößen im Fertigungsprozess berücksichtigt werden. Dies erfordert somit eine Kompromisslösung, die nur bei Kenntnis der Zusammenhänge zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führen kann.

[13] Arnold et al., 2008, S. 335
[14] vgl. Großklaus, 1996, S. 39 ff.
[15] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 4
[16] Gutenberg, 1983, S. 216

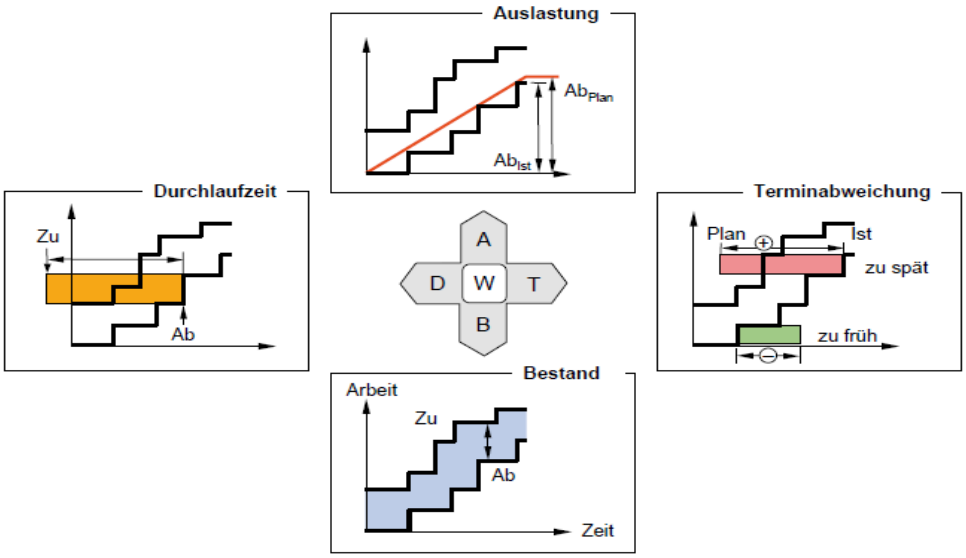


Abbildung 5: Zielkreuz der produktionslogistischen Zielgrößen[17]

1.4 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Rahmen der produktionslogistischen Positionierung kommt der Losgrößenplanung eine zentrale Bedeutung zu, da mit ihr großer Einfluss auf die mittlere Durchlaufzeit, den mittleren Werkstattbestand, die Termineinhaltung und andere bedeutende Kriterien der Produktionsplanung ausgeübt wird.[18] Sie ist somit eines der wichtigsten Entscheidungsprobleme im Zuge der operativen Produktionsplanung und -steuerung. Es wurde und wird sehr intensiv wissenschaftlich untersucht, jedoch lässt sich feststellen, dass seine Bedeutung in der Praxis offenbar bei weitem nicht so hoch eingeschätzt wird wie in der Theorie.[19] In den meisten Unternehmen werden zur Bestimmung von Losgrößen vor allem wirtschaftliche Kriterien herangezogen. Dabei werden im Prinzip die Lagerhaltungskosten der Produkte einerseits und die Auftragswechselkosten (im Wesentlichen die Rüstkosten) andererseits berücksichtigt. Diese "klassischen" Losgrößenbestimmungsverfahren lassen den Einfluss der Losgrößen auf die Durchlaufzeiten der Aufträge durch die Produktion und die damit verbundene Kapitalbindung durch Bestandsaufbau zumeist unberücksichtigt. Dabei bestimmen die Losgrößen durch ihren Einfluss auf Mittelwert und Streuung der Auftragszeiten maßgeblich die Gestalt des Materialflusses in einem Betrieb. Sowohl die Durchführungszeiten wie auch die Übergangszeiten in der Produktion sind also losgrößenabhängige Kapitalbindungszeiten und sollten daher in die Berechnung

[17] Wiendahl et al., 2009, S. 172
[18] Söhner, 1995, S. 30
[19] Missbauer, 1998, S. 3

wirtschaftlicher Losgrößen einbezogen werden.[20] Die mangelnde Berücksichtigung dieser Effekte lässt sich einerseits durch die Komplexität des Problems erklären, da zumeist eine mehrstufige Fertigung mit beschränkten Kapazitäten vorliegt, welche zwar theoretisch optimal gelöst werden kann, jedoch zu sehr hohem Rechenaufwand führt. [21] Zum anderen bereitet oftmals die Ermittlung und entsprechend genaue Aufbereitung der Daten Probleme. Jedoch sollten diese Gründe heutzutage nicht mehr als Erklärung der mangelhaften Akzeptanz von Losgrößenoptimierungsmodellen in der Praxis ausreichen.[22]

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht deshalb darin, einen analytisch nachvollziehbaren sowie belegbaren Zusammenhang zwischen der gewählten Losgröße und der logistischen Zielgröße Durchlaufzeit darzustellen. Dabei soll die Betrachtungsweise von zwei Seiten erfolgen: Einerseits soll die Auswirkung der verschiedenen Losarten sowie deren Kombinationen auf die Durchlaufzeit eines Auftrags durch eine einzelne wie auch durch mehrere Arbeitsstation(en) analysiert und beschrieben werden. Andererseits sollen auch die Einflüsse unterschiedlicher Auftragsstrukturen berücksichtigt werden.

In dieser Arbeit geht es weniger um die Optimierung von Losgrößen, sondern vielmehr um die Frage, wie sich, ausgehend von einem Werkstattmodell, die Durchlaufzeit ändert, wenn man die Losgröße eines Auftrags oder mehrerer Aufträge variiert. Allerdings kann man die gewonnenen Erkenntnisse in die Losgrößenoptimierung einfließen lassen.

1.5 Struktur der Arbeit

Im folgenden zweiten Kapitel werden die Modellierungsgrundlagen von Produktionsvorgängen vorgestellt. Dabei werden die elementaren Gesetze der Produktionslogistik beschrieben, deren Anwendung sodann in der Erstellung sogenannter Produktionskennlinien mündet, welche die Leistungs -, Bestands - und Durchlaufkennzahlen eines Arbeitssystems verdichtet darstellen.

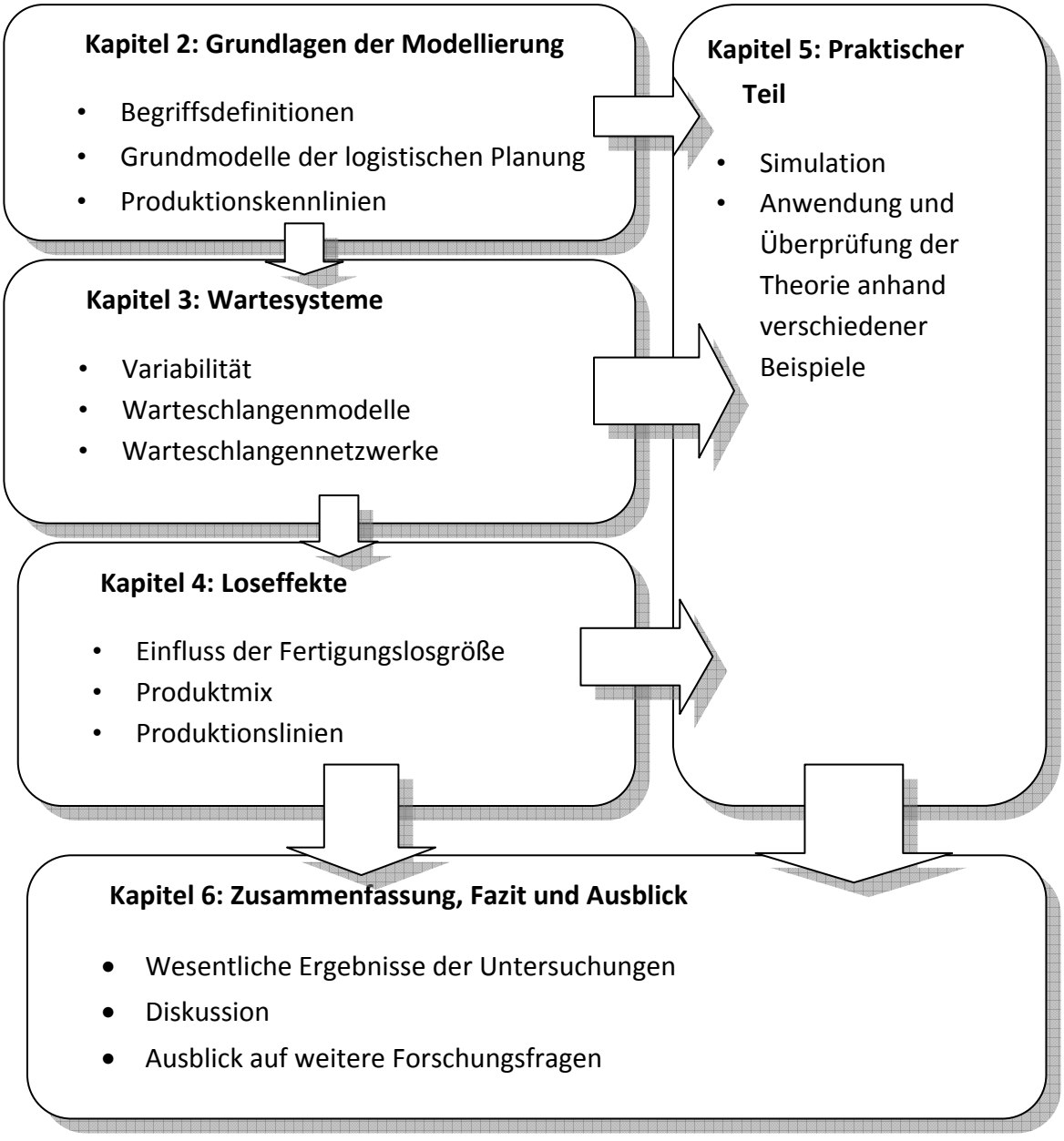
Im dritten Kapitel wird näher auf das Verhalten des Materialflusses an einem einzelnen Arbeitssystem, modelliert mit dem Ansatz der Warteschlangentheorie, eingegangen. Die Berechnung der bestimmenden Parameter bilden den Kern dieses Abschnitts. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse über die Zusammenhänge an einer einzelnen Arbeitsstation werden in Folge auf Netzwerke übertragen.

In Kapitel vier schließlich sollen die unterschiedlichen Effekte durch losweisen Transport und/oder losweise Fertigung herausgearbeitet werden. Dabei dienen die beiden Extremfälle des One - Piece - Flows und der geschlossenen Fertigung als Rahmen.

[20] Arnold et al., 2008, S. 329
[21] Recker, 2002, S.1
[22] Missbauer, 1998, S. 308

Das fünfte Kapitel bildet den praktischen Teil der Arbeit. Die im theoretischen Teil gewonnenen Erkenntnisse werden anhand einiger Beispiele, ausgehend von sehr einfachen Konstellationen bis hin zu etwas komplexeren Strukturen, auf ihre Anwendbarkeit geprüft. Außerdem sollen die Beispiele zusätzlich im Simulationsprogramm "Plant Simulation" der Firma technomatrix "nachgebaut" werden, um so die Ergebnisse vergleichen und interpretieren zu können.

Das sechste Kapitel schließlich fasst die Ergebnisse zusammen und bietet einen Ausblick auf weitere Forschungsfragen.



2 Grundlagen der Modellierung

Der Begriff Modell wird in der VDI- Richtlinie 3633, Blatt 1, folgendermaßen definiert: "Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild."[23]

Unter Modellierung versteht man also die zweckdienliche Abbildung realer Abläufe. Aufgrund der vielfältigen und sehr komplexen Prozesse in einem Produktionssystem sowie den wechselwirkenden Einflüssen der verschiedenen Faktoren ist es oftmals sehr schwer, ein reales Produktionssystem exakt zu beschreiben. Daher ist es von elementarer Bedeutung, mittels geeigneter Modelle die tatsächlichen Verhältnisse qualitativ richtig und in geeignetem Maße genau darzustellen.[24] Dazu werden einheitliche Begriffe und Kennzahlen definiert, die den tatsächlichen Produktionsprozess beschreiben. [25] Im folgenden Kapitel sollen die in Folge verwendeten Modelle und die sie definierenden Parameter sowie die damit beschriebenen grundlegenden Zusammenhänge kurz erläutert werden.

2.1 Modellabgrenzung

Um eine Aussage über die Zusammenhänge der wesentlichen Parameter in einem Fertigungsprozess machen zu können, müssen zunächst die Rahmenbedingungen für die gegenwärtige Betrachtung definiert und einige Abgrenzungen vorgenommen werden.

2.1.1 Produktionsprinzip

Zuerst wird das zugrundeliegende Produktionsprinzip betrachtet. Dieses wird in der Literatur auch als Anordnungstypologie oder Organisationstechnologie bezeichnet und beschreibt im Wesentlichen die Art, wie Aufträge bearbeitet werden.[26] Man unterscheidet hierbei zwischen[27]

- Baustellenfertigung (Platzprinzip), welche durch die Ortsgebundenheit des Produktes gekennzeichnet ist, Maschinen und Arbeitskräfte werden dorthin gebracht. Beispiele sind Hoch- und Tiefbau oder Schiffsbau.
- Werkstattfertigung (Funktions- oder Verrichtungsprinzip), welche eine sehr flexible Fertigung ermöglicht. Der Fluss der Produkte muss sich an der Anordnung der

[23] VDI, 2000, S.3
[24] Vgl. Lödding, 2008
[25] Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 2012
[26] Ebel, 2009, S. 168
[27] Kistner/Steven, 1990, S. 23 ff.

Arbeitsstationen orientieren. Anwendungsgebiete sind z.B. Einzel- oder Kleinserienfertigungen im Maschinenbau.

- Reihen- bzw. Linienfertigung, hier werden im Gegensatz zum Werkstattprinzip die Betriebsmittel dem Materialfluss der Produkte angepasst. Beispiel dafür ist z.B. die Reifenherstellung.
- Fließfertigung (Extremfall der Reihenfertigung, Massenfertigung), welche vor allem durch die Taktung der Arbeitsschritte und den daraus resultierenden kontinuierlichen Materialfluss gekennzeichnet ist. Beispiel: Fließbandfertigung, Schraubenherstellung.

Eine Übersicht über die wesentlichen Eigenschaften der unterschiedlichen Prinzipien liefert z.B. Kienzle: [28]

Merkmal des Erzeugnisspektrums und der Auftrags-struktur	Typische Merkmalsausprägung		
	Werkstattfertigung im Einzel- und Kleinserienbereich	Segmentierte Reihenfertigung im Mittelserienbereich	Fließfertigung im Großserienbereich
Variantenvielfalt	Hoch	Mittel	Gering
Wiederholhäufigkeit	Gering	Mittel	Hoch
Vielteiligkeit der Erzeugnisstruktur	Hoch	Mittel	Gering
Mengenvarianz	Hoch	Mittel	Gering
Bedarfsverlaufsvarianz	Hoch	Mittel	Gering
Änderungsaufkommen	Hoch	Mittel	Gering
Technologische Erzeugnisreife	Gering	Mittel	Hoch

Abbildung 6: Merkmale unterschiedlicher Fertigungsprinzipien

Im Kontext dieser Arbeit ist vor allem das Werkstättenprinzip interessant, da es zwischen der sehr standardisierten und starren Fließfertigung und der beinahe nicht planbaren Baustellenfertigung angesiedelt ist. Die Werkstattfertigung ist genau dann eine geeignete Organisationsform, wenn eine ständig variierende Auftragsstruktur mit veränderlichen Materialflüssen gegeben ist.[29] Diesem Prinzip können viele Produktionen zugeordnet werden, bei denen eine hohe Variantenvielfalt im Produktsortiment sowie mittlere bis kleine Losgrößen vorliegen.[30] Die weiteren Ausführungen sollen sich also immer auf eine solche "Werkstattsituation" beziehen. Wie bereits erwähnt basiert die Werkstattfertigung auf dem Verrichtungsprinzip, das heißt, es erfolgt eine räumliche Zusammenfassung von Aufgaben

[28] Kienzle, 2011, S. 16 ff.
[29] Corsten a), 2007, S. 341
[30] Ebel, 2009, S. 168

mit gleichen Funktionen.[31] Abbildung 7 zeigt ein einfaches Beispiel für eine typische Arbeitsplatzanordnung und Auftragsbearbeitungsabfolge nach dem Verrichtungsprinzip:

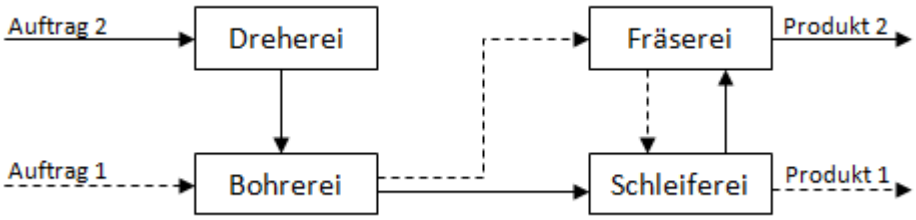


Abbildung 7: Werkstattprinzip[32]

Weiters sollen Zusammenhänge innerhalb einer Produktion dargestellt werden, daher sind hier natürlich die internen, messbaren Zielgrößen wie Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung oder Kapazität von Interesse. Diese stehen, wie vorhin bereits erwähnt, in direktem Zusammenhang mit den vom Kunden wahrgenommenen und bewertbaren externen Zielgrößen wie Lieferzeit, Liefertreue, Servicegrad und Preis.[33] In der vorliegenden Arbeit soll dem Titel entsprechend ein bestimmter Zusammenhang herausgearbeitet werden, nämlich jener zwischen Losgröße und der Durchlaufzeit eines Auftrages. Zu diesem Zweck wird das Augenmerk auf allen Größen, welche Einfluss auf die Auftragsdurchlaufzeit und damit auf die externe Zielgröße "Lieferzeit" ausüben, liegen, und sollen die anderen (externen) Zielgrößen wie bspw. Preis oder Flexibilität an dieser Stelle ausgeklammert werden.

2.1.2 Einordnung in der Planungshierarchie

Das Produktionsmanagement lässt sich im Allgemeinen in die folgenden Kernkomponenten aufgliedern:[34]

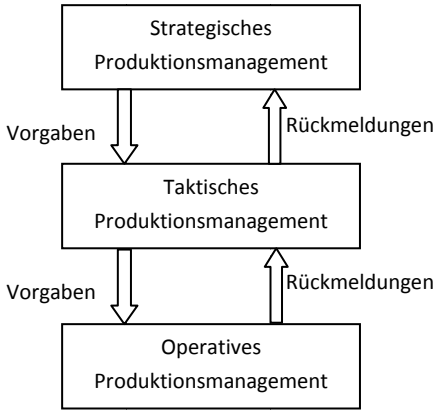


Abbildung 8 Planungsstufen des Produktionsmanagements[35]

[31] Corsten a), 2007, S. 340
[32] Quelle: Ebel, 2009, S. 168
[33] Lödding, 2008, S. 19 ff.
[34] Adam, 1992, S. 13

Es finden sich auch detailliertere Unterteilungen in der Literatur[36], jedoch ist die obige Strukturierung für den Zweck der vorliegenden Arbeit völlig ausreichend. Die Aufgabe der Produktionsplanung und -steuerung (PPS), welche im Wesentlichen ein Synonym für das Produktionsmanagement darstellt, besteht darin, die Fertigung so zu steuern, dass Aufträge richtig, das bedeutet, mit der richtigen Stückzahl an Einzelteilen sowie zum richtigen Zeitpunkt (vereinbarter Termin), fertiggestellt werden.[37] Die oberste Ebene, also die Stufe der *strategischen Planung*, trifft dabei langfristige Entscheidungen wie z.B. Produktpalette, Standorte, Betriebsmittel oder Marktstrategien. Sie schafft somit die grundlegenden Rahmenbedingungen für die zukünftige Entwicklung des Unternehmens und die nachfolgenden Planungsstufen.[38] In der Stufe der *taktischen Planung* werden hauptsächlich mittelfristig relevante Entscheidungen wie z.B. Investitionsentscheidungen, Produktkonzipierung, Variantenplanung etc. getroffen.[39] Die Stufe der *operativen* Planung wird auch als (operative) Produktionsprogrammplanung bezeichnet und führt die erforderliche Detailplanung der Produktion aufgrund der auf den vorangegangenen Stufen geschaffenen Rahmenbedingungen durch. Sie lässt sich wiederum in 8 Teilplanungsstufen unterteilen:[40]

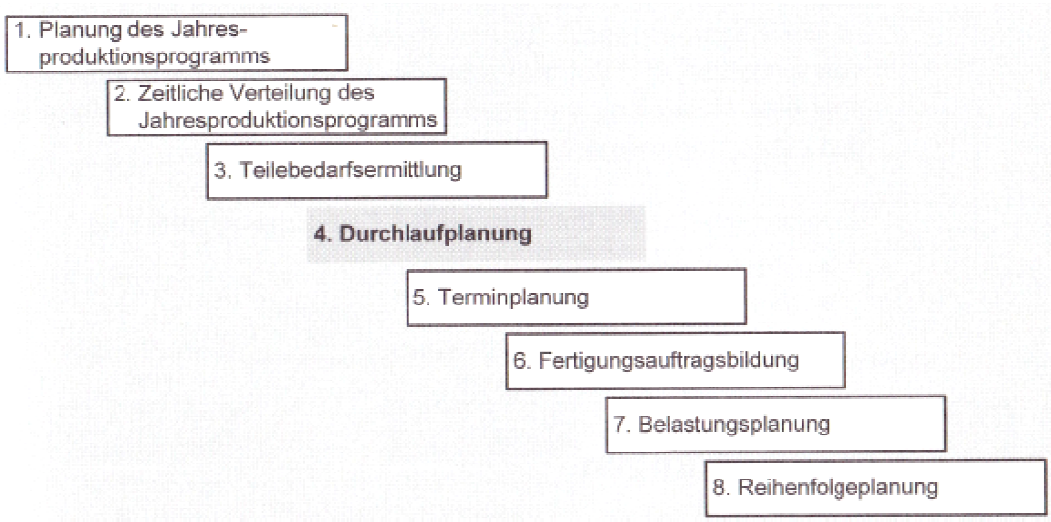


Abbildung 9: Planungsstufen der Produktionsprogrammplanung[41]

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit besteht in der Bestimmung der Auswirkungen von Mengengrößen auf Zeitgrößen. Die zugehörigen Schritte erfolgen in den Schritten 4 bis 8 in der obigen Abbildung. Die Kernaufgaben dieser Planungsschritte sind:[42]

---

[35] Quelle: Adam, 1992, S. 25
[36] z.B. Schneeweiß, 1992, S. 79
[37] Burkhalter, 2010, S. 10
[38] Söhner, 1995, S. 10
[39] Nebl, 2007, S. 607
[40] Nebl, 2007, S. 622 ff.
[41] Quelle: Nebl, 2007, S. 653
[42] Häfner, 1992, S. 44 ff.

- Einhaltung der Endtermine
- Minimierung der Durchlaufzeiten und
- Maximierung der Kapazitätsauslastung

In den folgenden Abschnitten sollen die für die weitere Betrachtung wesentlichen Begriffe und ihre Bedeutung für die Problemstellung erläutert werden.

2.2 Begriffsdefinitionen

Bevor auf die relevanten Beziehungen der Systemparameter eingegangen werden kann, sollen die wichtigsten Begriffe, mit welchen sich diese Arbeit beschäftigt, zunächst definiert werden (vergleiche Abbildung 10 und Abbildung 11). Diese Definitionen bilden die Grundlage aller folgenden Ausführungen.

2.2.1 externe Zielgröße Lieferzeit

Die Lieferzeit ist analog zur Definition in Abschnitt 2.1 die Zeit, welche benötigt wird, um einen Auftrag zu erhalten, zu erfüllen und auszuliefern, sie umfasst also die gesamte Zeitspanne vom Zeitpunkt des Empfangs des Kundenauftrags bis zur Lieferung des Produkts bzw. der Erfüllung der Dienstleistung. In diesem Zusammenhang wird an unterschiedlichen Stellen von Lieferfrist, Lieferzeit, Lieferzyklus oder Lieferdurchlaufzeit gesprochen, welche allesamt als Synonyme für die Lieferzeit dienen.[43] Aus Produktionssicht kann die Lieferzeit auch als Geschwindigkeit für die Leistungserstellung aus der Sicht des Kunden bezeichnet werden.[44]
Die Lieferzeit setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen:[45]

$$ZL = ZB + ZDA + ZLP + ZV + BV + ZAD \qquad \textbf{(2.1)}$$

ZL	*Lieferzeit [BKT]*
ZB	*Bestellzeit [BKT]*
ZDA	*Auftragsdurchlaufzeit [BKT]*
ZLP	*Lieferzeitpuffer [BKT]*
ZV	*Versandzeit [BKT]*
BV	*Belastungsverschiebung [BKT]*
ZAD	*Administrationszeit [BKT]*

***Anmerkung**: Abweichend von der Zitierquelle wurde hier ZDA anstatt ZDL verwendet, da die Durchlaufzeit (ZDL) in weiterer Folge nur den Durchlauf durch ein einzelnes Arbeitssystem darstellt, für die Lieferzeit jedoch die gesamte Durchlaufdauer aller erforderlichen Arbeitsschritte eines Produktionsauftrages von Relevanz ist.*

Abbildung 10 veranschaulicht diese Zusammenhänge:

[43] Schönsleben, 2011, S. 9
[44] Grabner, 2012, S. 144
[45] Lödding, 2008, S. 40

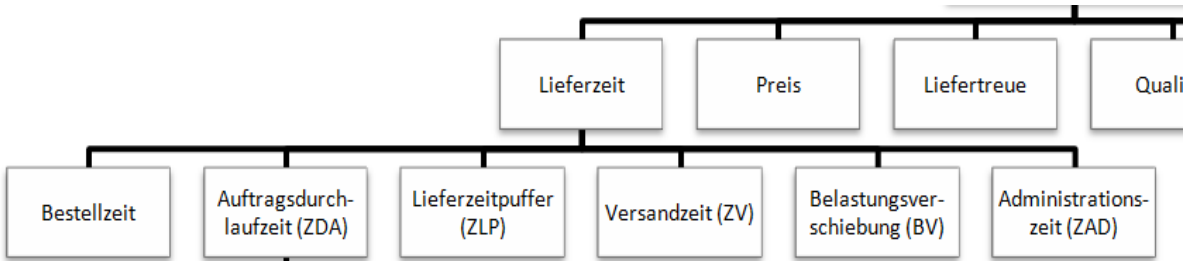


Abbildung 10: Bestandteile der Lieferzeit[46]

Da von diesen Komponenten nur die Auftragsdurchlaufzeit ZDA mit der Fertigung an sich zu tun hat und man aus Sicht der Fertigung wenig Einfluss auf die anderen Bestandteile der Lieferzeit hat, soll hier eine weitere Abgrenzung erfolgen und die restlichen Komponenten, die in die Zielgröße Lieferzeit einfließen, wie z.B. die Bestellzeit, in dieser Arbeit nicht behandelt werden.

Das folgende Bild bietet einen Überblick über die in dieser Arbeit behandelten Themenbereiche sowie deren hierarchische Gliederung:

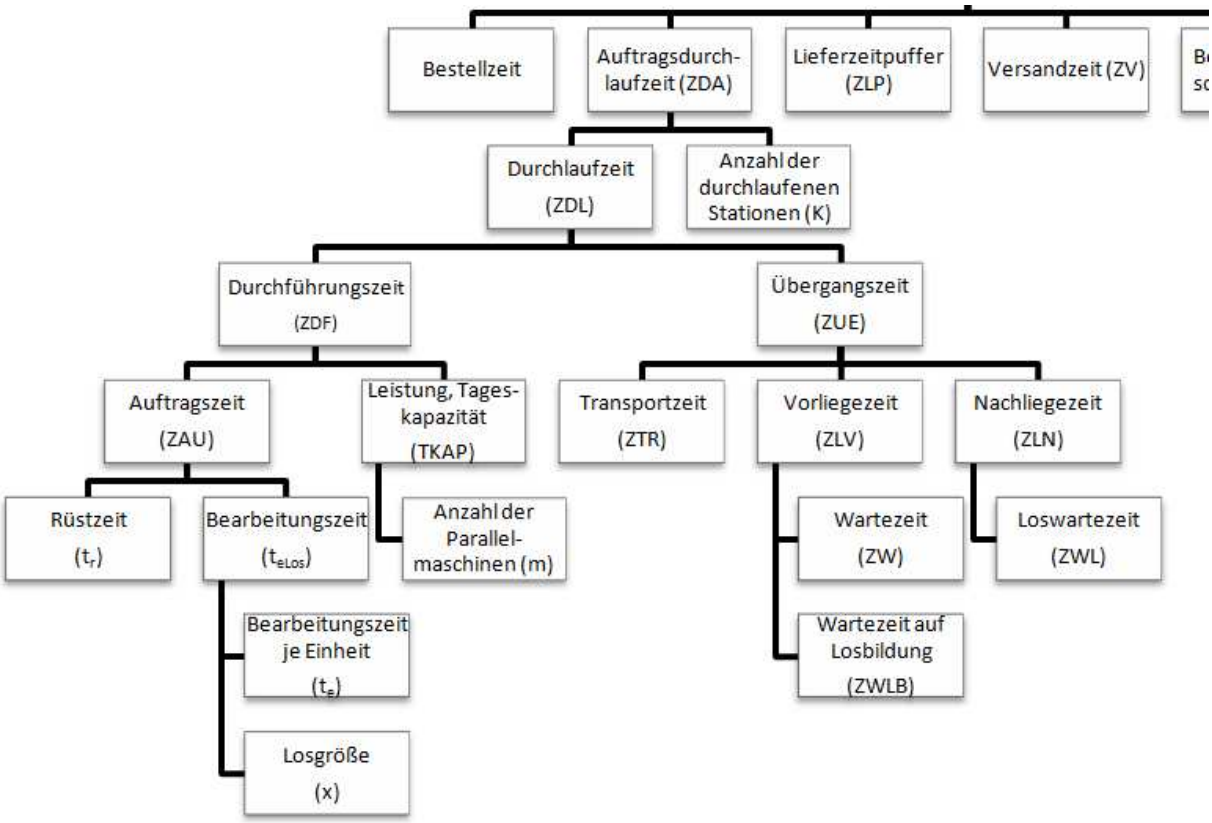


Abbildung 11: Systemabgrenzung[47]

Die folgenden Abschnitte sollen nun zur Definition der in der obigen Grafik dargestellten Größen dienen.

[46] Quelle: eigene Darstellung
[47] Quelle: eigene Darstellung

2.2.2 Losgröße

Ein (Fertigungs-) Los wird in der Literatur als *"Anzahl gleichartiger Objekte, die auf einem Arbeitsträger unmittelbar nacheinander ohne Rüstvorgänge zu fertigen sind"*[48] definiert. Aus wirtschaftlichen Gründen erfolgt die Bearbeitung eines Auftrages zumeist in Losen, welche nacheinander die einzelnen Fertigungsschritte durchlaufen. Die Größe dieser Lose ist bestimmend für den Bestand an und zwischen den Arbeitsstationen (und damit die Lagerkosten), die Rüsthäufigkeit sowie die Bearbeitungszeit an den Stationen.[49]

2.2.3 Kapazität, Leistung und Auslastung

Die Kapazität einer Arbeitsstation kann auch als Tageskapazität (TKAP) bezeichnet werden. Sie ist definiert als jene Zeit, in der die Station theoretisch für die Bearbeitung der Aufträge zur Verfügung steht (z.B. 8 Stunden pro Tag bei Einschichtbetrieb).

Die maximale Leistung des Systems definiert sich als die obere Leistungsgrenze eines Arbeitssystems, bestimmt durch den restriktiven Kapazitätsfaktor (Betriebsmittel oder Personal). Hierin sind bereits Maschinenausfälle, Wartungsarbeiten, Pausen, Krankheit etc. einbezogen.[50]

$$L_{max} = \min\{BKAP, PKAP\} \qquad \textbf{(2.2)}$$

L_{max} *maximal mögliche Leistung [Std/BKT]*
$BKAP$ *Betriebsmittelkapazität [Std/BKT]*
$PKAP$ *Personalkapazität [Std/BKT]*

Im Rahmen dieser Arbeit interessieren vor allem die Restriktionen, welche aus den Arbeitssystemeigenschaften sowie den Eigenschaften des Materialflusses resultieren. Abbildung 12 veranschaulicht die verschiedenen leistungsmindernden Faktoren (vgl. dazu auch Abschnitt 3.3).

In der Literatur wird oftmals die maximale Leistung eines Arbeitssystems vereinfachend mit der Tageskapazität gleichgesetzt. Begründet wird dies laut Nyhuis/Wiendahl "*damit, dass die Durchführungszeit im Allgemeinen klein ist gegenüber der Durchlaufzeit und somit eine Ungenauigkeit zugunsten eines geringeren Erfassungs- und Rechenaufwandes billigend in Kauf genommen werden kann. Soweit die Analyse der Durchlaufzeit im Vordergrund steht, kann dieser Argumentation gefolgt werden.*"[51]

[48] Domschke/Scholl., 2005, S. 151
[49] Vgl. Sahling, 2010
[50] Kerner, 2002, S. 19
[51] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 20

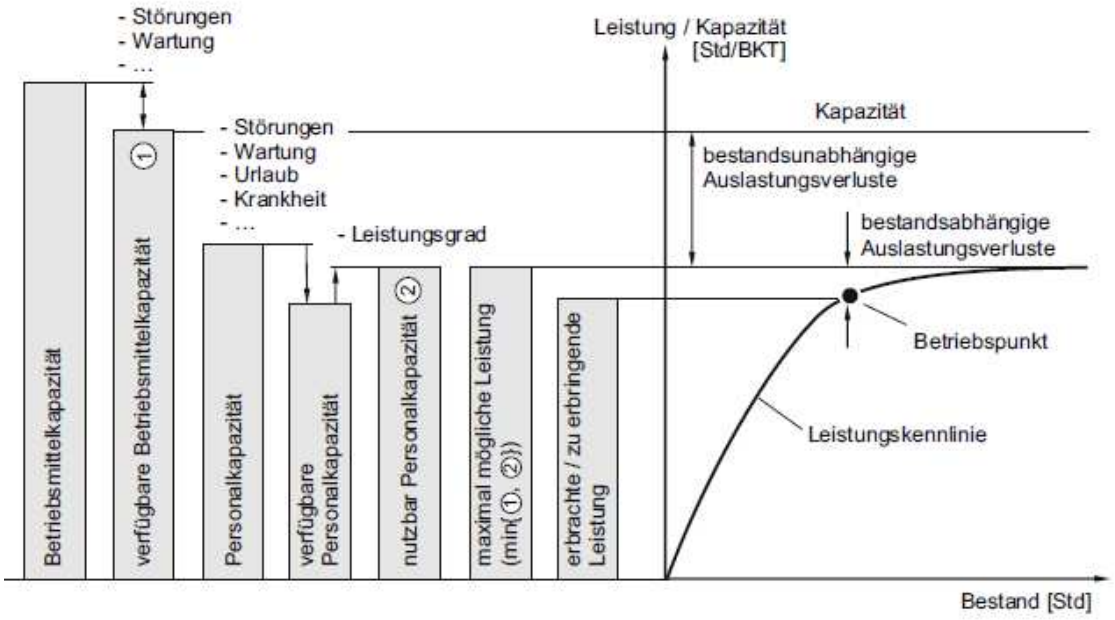


Abbildung 12: Kapazität und Leistung

Da in der vorliegenden Arbeit die Durchlaufzeit die wesentliche Zielgröße darstellt, gilt - unter Vernachlässigung des Leistungsgrades (also Leistungsgrad = 1) - im Weiteren:[52]

$$L_{max} = \mathrm{TKAP} \qquad \textbf{(2.3)}$$

$$TKAP \quad Tageskapazität\ [Std/BKT]$$

Die erbrachte, messbare Leistung eines Systems schließlich ist jener Anteil der Kapazität, welcher auch tatsächlich zur Bearbeitung der Aufträge genutzt wird. Sie entspricht also der Menge der in einem bestimmten Zeitraum zurückgemeldeten Arbeitsinhalte. Grinninger liefert hierzu eine ziemlich genaue Erklärung: "*Die Leistung eines Arbeitssystems wird in der Produktionspraxis häufig als Durchsatz, Produktionsrate oder Ausbringung bezeichnet und in Bezug auf eine Zeiteinheit angegeben. Die mittlere Auslastung beschreibt dagegen das Verhältnis von mittlerer (tatsächlicher) zu maximal möglicher Leistung eines Arbeitssystems. Mit steigender Auslastung der Arbeitssysteme kann ein Unternehmen – die Nachfrage vorausgesetzt – seine Ausbringung und die Umsatzerlöse steigern. Da die Betriebsmittelkosten zum Großteil unabhängig von der Ausbringung sind, resultiert daraus für das Unternehmen ein höherer Gewinn.*"[53]

[52] vgl. dazu Wiendahl, 1987, S. 50 ff.
[53] Grinninger, 2012, S. 110

Die mittlere Leistung eines Systems ist also als Quotient aus geleisteter Arbeit und einem definierten Bezugszeitraum definiert[54] (weitere Erläuterungen dazu folgen in Abschnitt 2.3.3):

$$L_m = \frac{AB}{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n} ZAU_i}{P} \qquad \textbf{(2.4)}$$

Lm $mittlere\ Leistung\ [Std/BKT]$
AB $Summe\ der\ Abgänge\ (=\ geleistete\ Arbeit)\ [Std]$
P $Bezugszeitraum\ [BKT]$

Die Auslastung der Station ergibt sich schließlich als Quotient aus mittlerer und maximaler Leistung. Sie ist der Anteil der Zeit, in der die Station tatsächlich mit der ihr zugedachten Aufgabe beschäftigt ist.[55]

$$u = \frac{A_m}{100} = \frac{L_m}{L_{max}} \qquad \textbf{(2.5)}$$

u $Auslastung\ [1]$
A_m $Auslastung\ [\%]$

Die Auslastung ist die wichtigste Kennzahl eines Arbeitssystems, da von ihr alle anderen Leistungs- und Zeitgrößen abhängen.[56] Die Arbeitsstation mit der (langfristig) höchsten Auslastung bildet den Produktionsengpass (vgl. Abschnitt 2.3.1). Diese Definition ist genauer und allgemeiner zutreffend als jene, welche die Station mit der geringsten Kapazität oder auch die langsamste Station im Netzwerk als den Engpass bezeichnen, da bspw. eine langsame Station, welche jedoch nur von wenigen Werkstücken durchlaufen wird, oftmals eine weitaus niedrigere Auslastung besitzt als eine schnelle Arbeitsstation, an welcher alle Werkstücke eines Auftragmixes bearbeitet werden.[57] Viele Unternehmen legen besonderen Wert darauf, sehr teure Maschinen möglichst hoch auszulasten, um so ihre Refinanzierung zu sichern. Jedoch führt dies zur Erzeugung von künstlichen Engpässen, was auch zu hohen Beständen und Durchlaufzeiten an diesen Stationen führt, was oft nicht zielführend ist.[58]

2.2.4 Auftragszeit

Die Auftragszeit (ZAU) bildet die Grundlage einer jeden Produktionsplanung. Sie ist als jene Zeit (in Stunden) definiert, die für die Ausführung eines Arbeitsvorganges an einem

[54] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 26
[55] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 27
[56] Häfner, 1992, S. 94
[57] vgl. dazu Hopp/Spearman, 2001, S. 218 ff.
[58] Lödding, 2008, S. 36

Arbeitssystem vorgesehen ist.[59] Sie stellt also sozusagen den Arbeitsinhalt eines Auftrages (in Stunden) dar. Sie ergibt sich aus der Rüstzeit je Los, der effektiven Bearbeitungszeit je Mengeneinheit und der Losgröße zu

$$ZAU = x * t_e + t_r \quad \textbf{(2.6)}$$

ZAU *Auftragszeit [Std]*
x *Losgröße [Stk]*
t_e *Bearbeitungszeit für Einzelteil [Std]*
t_r *Rüstzeit [Std]*

Die Auftragszeit variiert zumeist sehr stark und wird daher üblicherweise mit Mittelwert und Standardabweichung beschrieben:[60]

$$ZAU_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} ZAU_i}{n} \quad \textbf{(2.7)}$$

ZAU_m *Mittelwert der Auftragszeiten [Std]*
ZAU_i *Auftragszeit des Auftrages i*
n *Anzahl der Aufträge*

$$ZAU_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(ZAU_i - ZAU_m)^2}{n}} \quad \textbf{(2.8)}$$

ZAU_s *Standardabweichung der Auftragszeitverteilung [Std]*

Zwecks Vergleichbarkeit unterschiedlicher Verteilungen wird zur Beschreibung derselben oft der Variationskoeffizient herangezogen, welcher eine dimensionslose Kennzahl darstellt und die Standardabweichung zum Mittelwert ins Verhältnis setzt:

$$ZAU_v = \frac{ZAU_s}{ZAU_m} \quad \textbf{(2.9)}$$

ZAU_v *Variationskoeffizient der Auftragszeitverteilung [-]*

Genauere Beschreibungen dazu finden sich in Kapitel 4.2 (die Auftragszeit ZAU entspricht der dort erläuterten Zeitgröße $t_{e,Los}$).

2.2.5 Durchführungszeit

Die Auftragszeit (ZAU) wird wie erwähnt in Vorgabestunden ausgegeben. Für die weitere Vorgehensweise benötigt man jedoch zwecks Vergleichbarkeit mit den anderen Größen

[59] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 17
[60] vgl. Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 19

diese Kennzahl in der Dimension Betriebskalendertage (BKT). Daher wird an dieser Stelle die Durchführungszeit (ZDF) eingeführt, welche ausdrückt, wie viel Zeit [in BKT] ein Arbeitssystem benötigt, um einen Auftrag mit dem Arbeitsinhalt ZAU abzuarbeiten.[61] Die Durchführungszeit ist abhängig vom Arbeitsinhalt ZAU sowie von der Tageskapazität bzw. der maximalen Leistung, die das Arbeitssystem zu leisten imstande ist. Wird z.B. ein Auftrag mit ZAU = 16 Stunden bearbeitet, so bedeutet dies für ein Arbeitssystem mit Einschichtbetrieb (TKAP = 8 Stunden pro BKT) eine ZDF von 2 BKT, für ein Arbeitssystem mit Zweischichtbetrieb jedoch eine ZDF von 1 BKT.

$$ZDF = \frac{ZAU}{TKAP} \qquad \textbf{(2.10)}$$

ZDF $Durchführungszeit\ [BKT]$
$TKAP$ $Tageskapazität\ [Std/BKT]$

Mittelwert und Standardabweichung der Durchführungszeit bestimmen sich analog zur Auftragszeit ZAU, also gilt $ZDF_m = ZAU_m/TKAP$ und $ZDF_v = ZAU_v$.[62]

Die Durchführungszeit bezeichnet also "*jene Zeitanteile eines Prozesses, in denen die Wertschöpfung am Produkt durchgeführt wird. Bezogen auf ein Sachgut sind dies Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten. Die Durchführungszeit kennzeichnet den Ressourcenverbrauch an Personal und Betriebsmitteln und wirkt sich damit auf die Produktkosten aus*."[63]

2.2.6 Übergangszeit

Die Übergangszeit setzt sich im Wesentlichen aus den Elementen Liegen nach Bearbeitung, Transport und Liegen vor Bearbeitung zusammen.[64] Das Element "Liegen vor Bearbeitung" kann auch als Wartezeit (ZW) bezeichnet werden. Diese Wartezeit bildet in den meisten Produktionen den weitaus größten Anteil an der gesamten Durchlaufzeit. [65] Die Übergangszeit wird in den meisten Unternehmen basierend auf Erfahrungswerten geschätzt und festgelegt.[66] Aufgrund ihrer großen Bedeutung für die Durchlaufzeit soll sie jedoch in der vorliegenden Arbeit als eine Ausgangsgröße betrachtet und wird daher genauer erläutert werden. Die Vorgehensweise sowie die entsprechenden Berechnungen dazu finden sich in Kapitel 3.

[61] Lödding, 2008, S.61
[62] vgl. Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 21
[63] Grabner, 2012, S. 144
[64] Lödding, 2008, S. 53
[65] Wiendahl, 1987, S.54
[66] Grabner, 2012, S. 145 ff.

2.2.7 Durchlaufzeit

Der Begriff Durchlaufzeit kann als die Zeitspanne definiert werden, welche ein Auftrag von der Beendigung des vorhergehenden Arbeitsvorganges bis zum Bearbeitungsende des betrachteten Arbeitsvorganges selbst benötigt.[67] Sie kann auch als die Geschwindigkeit der Durchführung eines Auftrages aufgefasst werden.[68] Dabei werden die Liegezeit, die Transportzeit sowie die Rüstzeit der betroffenen Arbeitsstation der Durchlaufzeit dieses Arbeitsvorganges zugerechnet, auch wenn sie nicht unmittelbar der Bearbeitung des Auftrags dienen. Die Durchlaufzeit berechnet sich demnach aus der Differenz der Abmeldezeitpunkte TBE und TBEV.[69]

$$ZDL = TBE - TBEV \qquad \textbf{(2.11)}$$

ZDL $Durchlaufzeit\ [BKT]$
TBE $Termin\ Bearbeitungsende\ des\ betrachteten\ Arbeitsvorganges$
$TBEV$ $Termin\ Bearbeitungsende\ des\ vorhergehenden\ Arbeitsvorganges$

Die Durchlaufzeit durch einen Arbeitsvorgang stellt zumeist das kleinste betrachtete Element der Durchlaufplanung dar und wird daher auch als Durchlaufelement bezeichnet, siehe Abbildung 13:

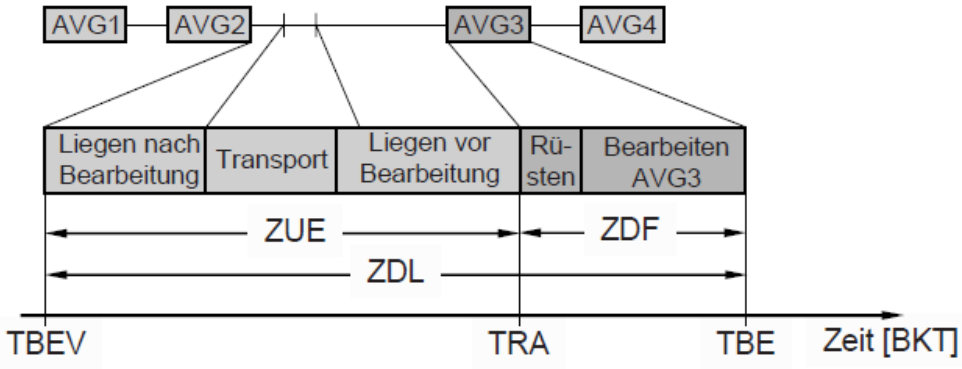


Abbildung 13: Elemente der Durchlaufzeit[70]

Dieses Durchlaufelement (dessen Länge ZDL entspricht) setzt sich wiederum aus den vorhin definierten Anteilen Übergangszeit (ZUE) und der Durchführungszeit (ZDF) zusammen.[71]

$$ZDL = ZUE + ZDF \qquad \textbf{(2.12)}$$

ZUE $Übergangszeit\ [BKT]$
ZDF $Durchführungszeit\ [BKT]$

[67] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 21
[68] Grabner, 2012, S. 144
[69] Wiendahl, 1987, S.54
[70] Quelle: Nyhuis, 2008, S. 192
[71] Wiendahl, 1987, S. 55

2.2.8 Auftragsdurchlaufzeit

Eine Werkstatt besteht in der Regel aus mehreren Arbeitsstationen, welche vom betrachteten Auftrag in einer bestimmten Reihenfolge bis zu seiner Fertigstellung durchlaufen wird (vgl. Abbildung 13). Damit besteht die Auftragsdurchlaufzeit ZDA aus der Summe der Durchlaufzeiten ZDL_i der einzelnen Arbeitsvorgänge.

$$ZDA = \sum_{i=1}^{k} ZDL_i \qquad (2.13)$$

ZDA $\quad$ $Auftragsdurchlaufzeit\ [BKT]$
ZDL_i $\quad$ $Durchlaufzeit\ des\ Arbeitsvorgangs\ i\ [BKT]$
k $\quad$ $Anzahl\ der\ Arbeitsvorgänge\ [1]$

Die durchschnittliche Auftragsdurchlaufzeit bei mehreren Produkten wird durch geeignete Gewichtung und anschließende Summierung der einzelnen Auftragsdurchlaufzeiten ermittelt (vergleiche dazu Abschnitt 4.4).[72] Zudem ist bei der Berechnung der Auftragsdurchlaufzeit zu beachten, dass man bei parallel laufenden Prozessen immer die längsten Durchlaufelemente für die Summierung heranzieht, den sogenannten "kritischen Pfad".[73]

Im einfachen Fall der folgenden Abbildung ergibt sich also die Auftragsdurchlaufzeit als Summe des Fertigungsauftrages 2 und der Montagedurchlaufzeit.

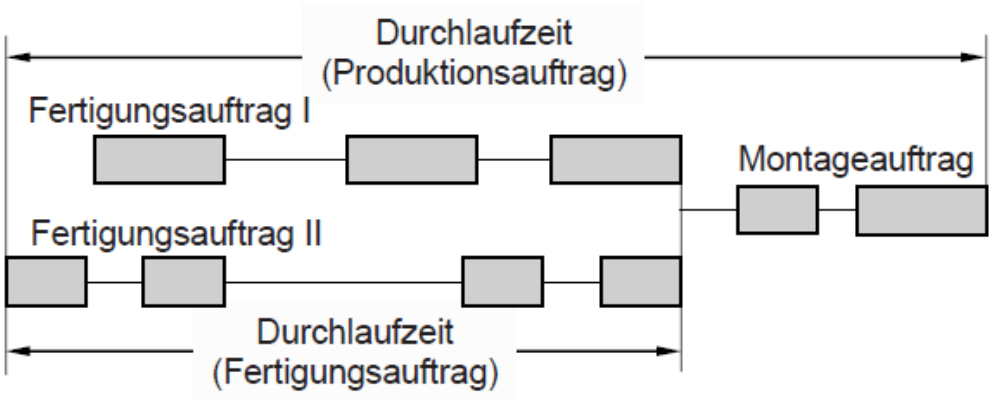


Abbildung 14: Auftragsdurchlaufzeit[74]

Für die erste Arbeitsstation einer Produktionslinie existiert kein Vorgänger (bzw. liegt dieser außerhalb der Systemgrenzen), daher wird für den Beginn der Auftragsbearbeitung der Auftragseinstoßtermin (Zeitpunkt der Auftragsfreigabe) gewählt. Danach summiert man die Durchlaufelemente der folgenden Arbeitsplätze, bis man nach Beendigung des letzten

[72] Söhner, 1995, S. 33
[73] Lödding, 2008, S.52
[74] Quelle: Nyhuis, 2008, S. 192

Arbeitsschrittes am Auftragsfertigstellungstermin TAF angelangt ist.[75] Damit ergibt sich die Auftragsdurchlaufzeit zu

$$ZDA = TAF - TAE \qquad \textbf{(2.14)}$$

ZDA $Auftragsdurchlaufzeit\ [BKT]$
TAF $Termin\ Auftragsfertigstellung$
TAE $Termin\ Auftragserzeugung\ (Auftragsfreigabe)$

2.3 Grundmodelle der logistischen Planung

In den folgenden Abschnitten sollen die wichtigsten Grundlagen und Erkenntnisse zur Modellierung von Produktionsabläufen dargestellt werden, welche in den darauffolgenden Kapiteln 3 und 4 sowie im praktischen Teil (Kapitel 5) zur Anwendung kommen.

2.3.1 Theory of Constraints

Theory of Constraints kann übersetzt werden mit "Theorie des Engpasses". Sie stellt fest, dass für die Leistungsfähigkeit eines jeden Arbeitssystems der mögliche Durchsatz an einer bestimmten Station, dem Engpass, ausschlaggebend ist. Dieser Zusammenhang wurde zuerst von Eliyahu Moshe Goldratt, einem israelischen Physiker, formuliert, und dient in der modernen Management- und Logistiklehre als grundlegende Erkenntnis. Goldratt zeigt auf, dass der Durchsatz einer Produktion in der Regel von wenigen Engpässen definiert wird. Eine Produktion, in der alle Maschinen gleich stark ausgelastet sind - eine sogenannte "ausbalancierte Linie", ist demnach (in einer Werkstattumgebung) unrealistisch. [76] Den Engpass der Linie stellt dabei in der Regel die Arbeitsstation mit der höchsten (langfristigen) Auslastung dar. Wichtig ist hierbei anzumerken, dass es sich dabei nicht immer um die "langsamste" Station handeln muss. Wird eine sehr schnelle Maschine mit großer Kapazität sehr stark belastet (z.B. wenn sie mehrfach durchlaufen wird), so kann sie durchaus den Engpass der Produktionslinie darstellen. [77] Auch kann ein Engpass durch mangelnde Koordination entstehen, wenn z.B. eine an sich schnelle Station nur ungenügend mit Werkstücken versorgt wird und dies in einem geringen Durchsatz resultiert.[78] Jedoch stellt dies strenggenommen kein ablaufbedingter Engpassverhalten dar, da es durch verbesserte Versorgung aufgehoben werden kann. Ebenfalls ist es möglich, dass der Engpass sich im Laufe der Zeit in der Produktionslinie verschiebt, also bei unterschiedlichen Aufträgen unterschiedliche Stationen den Durchsatz in der Produktionslinie beschränken. Aus der

[75] Wiendahl, 1987, S. 63
[76] Goldratt, 1981
[77] Hopp/Spearman, 2001, S. 218
[78] Puffer, 2007, S.80

Durchsatzbeschränkung am Engpass resultiert in der Regel eine sehr niedrige Gesamtauslastung der Produktionslinie, oftmals nur ca. 50 bis 60%.[79]

Deshalb empfiehlt sich, die Engpässe der Produktion frühzeitig zu identifizieren und über eine Auslastungssteigerung an diesen Engpässen den Gesamtdurchsatz der Produktion zu steigern. Jedoch ist dabei darauf zu achten, dass sich durch eine höhere Auslastung zwangsläufig auch höhere Bestände und Durchlaufzeiten einstellen.[80]

2.3.2 Das Trichtermodell

Aufbauend auf den Erkenntnissen der "Theory of Constraints" wurde an der Universität Hannover Anfang der 70er Jahre ein Modell zur Veranschaulichung der Zusammenhänge entwickelt. Die Engpasstheorie besagt, dass jede Produktion über ein oder mehrere System(e) verfügt, welche als Engpass fungieren und die Leistungsfähigkeit des gesamten Systems bestimmt (bestimmen).[81] Wenn man diese Aussage illustriert, ergibt sich folgende Grafik:

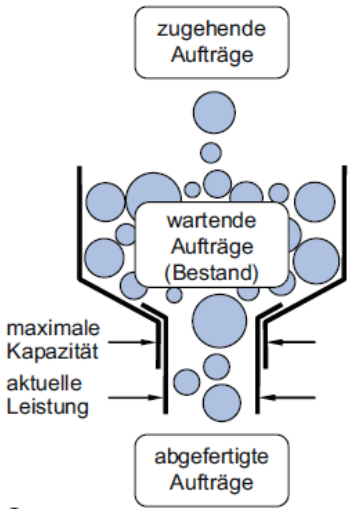


Abbildung 15: Trichtermodell[82]

Nachdem prinzipiell eine jede Arbeitsstation in einer Produktion den Engpass darstellen kann, gilt das Trichtermodell in seiner Form auch für jeden Arbeitsplatz in der Produktion. Man kann es analog auch auf Arbeitsplatzgruppen oder die gesamte Produktion anwenden.[83] Es wird daher von Nyhuis und Wiendahl als "*allgemeingültiges Beschreibungsmodell für Produktionsprozesse*" beschrieben.[84] Das Trichtermodell stellt die Größen Zugang, Abgang und Bestand in Relation zueinander dar, wodurch eine jede

[79] Puffer, 2007, S.79
[80] Bornhäuser, 2009, S. 45
[81] Al Khateeb, 2014, S. 89
[82] Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 25
[83] Wiendahl, 1987, S.100
[84] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 17

beliebige Kapazitätseinheit vollständig definiert werden kann. Die Vorgänge am Trichter können folgendermaßen beschrieben werden: "*Die am Arbeitssystem ankommenden (Auftrags-) Lose bilden gemeinsam mit den dort bereits vorliegenden Losen einen Bestand an wartenden Aufträgen. Diese fließen nach der Bearbeitung aus dem Trichter ab. Die Trichteröffnung symbolisiert dabei die mittlere Leistung (in der Praxis auch als Durchsatz, Output oder Ausbringung bezeichnet), die innerhalb der Kapazitätsgrenzen variiert werden kann.*" [85]

Diese vereinfachende Vorstellung von fließenden Fertigungsaufträgen setzt allerdings voraus, dass "*alle Auftragsarten (Eilaufträge, Lageraufträge, Forecastaufträge, etc.) mit derselben Geschwindigkeit durch die Produktion fließen. Die wesentlichen Stellgrößen der flussorientierten Strategie sind Zugang und Abgang, die durch die Werkstattsteuerungsaufgaben, Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung beeinflusst werden*."[86] Diese Restriktion wird in der späteren Diskussion eine wesentliche Rolle spielen (siehe dazu Abschnitt 3.3.5. und 3.4.4.).

2.3.3 Das Durchlaufdiagramm

Das Durchlaufdiagramm ist eine Ableitung des Trichtermodells und ermöglicht es, quantitative Zusammenhänge zwischen den einzelnen auftretenden Größen darzustellen.[87] Es entsteht, indem Zugang und Abgang des Trichters gemessen und mit ihrem Arbeitsinhalt in Vorgabestunden kumuliert über der Zeit aufgetragen werden. Der Verlauf der Zugangskurve entsteht, indem man - ausgehend von einem eventuellen Anfangsbestand - zugehende Arbeit mit ihrem Arbeitsinhalt (in Stunden, Auftragszeit) und entsprechend den Zugangszeitpunkten einträgt. Bei der Konstruktion der Abgangskurve verfährt man analog mit abgehenden Arbeitsinhalten.[88] Die folgende Abbildung 16 zeigt ein solches Durchlaufdiagramm. Der vertikale Abstand zwischen der Zugangs- und der Abgangskurve zu einem gewählten Zeitpunkt T stellt den zu diesem Zeitpunkt vorhandenen (Auftrags-) Bestand am System dar. Der horizontale Abstand der in Gedanken geglätteten Verläufe wird als Reichweite des Arbeitssystems bezeichnet. Diese Kenngröße ist sehr eng mit der Durchlaufzeit verknüpft. In manchen Arbeiten werden die beiden Größen sogar als identisch angesehen[89] (was jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen gilt, siehe weiter unten). Die Reichweite gibt an, wie lange der aktuelle Bestand (zum Zeitpunkt T) ausreicht, um das Arbeitssystem - bei gleichbleibender Leistung - durchgehend mit genügend Arbeit zu

[85] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.25
[86] Bornhäuser, 2009, S. 49
[87] Lödding, 2008, S. 50
[88] Wiendahl, 1987, S. 100
[89] vgl. z.B. Grabner, 2012, S. 196

versorgen.[90] Die mittlere Leistung (Breite der Trichteröffnung im Trichtermodell) bezeichnet hier die Steigung der Abgangskurve.

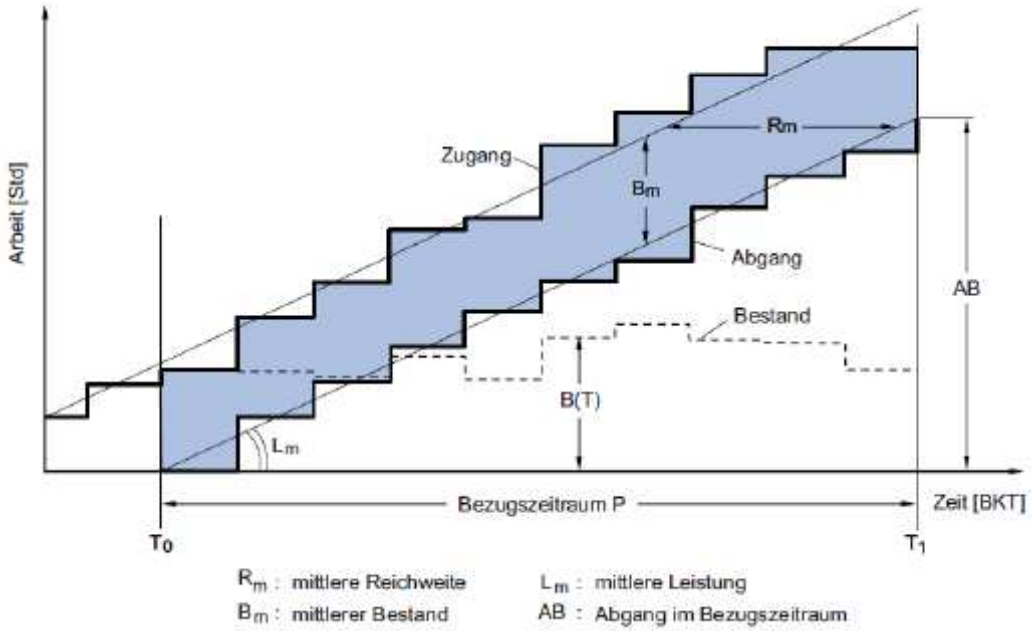


Abbildung 16: Durchlaufdiagramm [91]

Anhand des Durchlaufdiagramms lässt sich nun eine mathematische Beziehung zwischen den auftretenden Größen mittlerer Bestand, mittlere Reichweite und mittlere Leistung ableiten. Aus der Trigonometrie folgt:[92]

$$L_m = \frac{AB}{P} = \frac{B_m}{R_m} \qquad \textbf{(2.15)}$$

mit

AB	*Abgang [Std]*
P	*Länge des Bezugszeitraums [BKT]*
L_m	*mittlere Leistung [Std/BKT]*
B_m	*mittlerer Bestand [Std]*
R_m	*mittlere Reichweite [BKT]*

Diese Beziehung wird auch als *Trichterformel* bezeichnet.[93] Anhand des Durchlaufdiagrammes lassen sich auch Aussagen über die Durchlaufzeit eines Auftrages machen. Schneidet man das Durchlaufdiagramm waagrecht, so ergibt sich die Durchlaufzeit als Abstand zwischen der mit dem Zeitpunkt T bezeichneten "Abgangsstufe" und der dazugehörigen "Zugangsstufe". Sie gibt also an, wie lange das zum Zeitpunkt T abgefertigte Los im Arbeitssystem verweilt hat.[94] Allerdings ist diese Aussage nur unter der Annahme

[90] Lödding, 2008, S.54
[91] Quelle: Bechte, 1984 (zit. nach Lödding, 2008, S.54)
[92] Lödding, 2008, S. 55
[93] Lödding, 2008, S. 55
[94] Wiendahl, 1987, S.113

zulässig, dass keine Reihenfolgevertauschungen vorliegen sowie ein konstanter Bedarfsverlauf gegeben ist.[95]

Trägt man nun die Durchlaufelemente der einzelnen Aufträge, welche das Arbeitssystem durchlaufen, mit ihrer jeweiligen Länge (TBE - TBEV = ZDL) und ihrer Höhe (ZAU) in das Durchlaufdiagramm ein, so kann eine Aussage über das Abfertigungsverhalten des betrachteten Arbeitssystems gemacht werden. Bei einer strengen First In - First Out - Abfertigung (FIFO) liegen die Elemente genau zwischen Zu- und Abgangskurve - die Durchlaufzeit ist somit gleich der Reichweite. Wird die Reihenfolge der Aufträge vertauscht, so weichen die Anfänge der Durchlaufelemente oft stark von der Zugangskurve ab. Die Elemente werden dadurch oft erheblich länger, da sie immer wieder zurückgestellt werden und warten müssen.[96] Abbildung 17 veranschaulicht diesen Umstand:

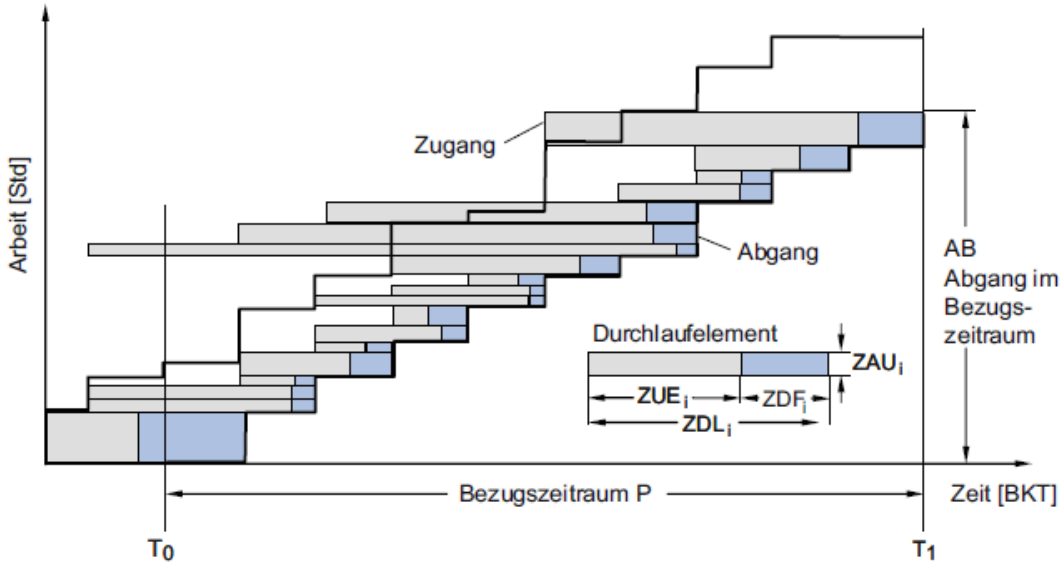


Abbildung 17: Durchlaufdiagramm mit Durchlaufelementen[97]

Anhand der Beziehung (2.15) lässt sich erkennen, dass man die Durchlaufzeit in einem Arbeitssystem entweder durch Steigerung der Leistung oder durch Reduktion des Bestandes erreichen kann. Die Leistung lässt sich leider nur sehr schwer als Regelgröße heranziehen, da sie sich aus der Marktnachfrage und den Kapazitäten im Betrieb ergibt. Damit bleibt der Bestand als variierbarer Faktor übrig. Über direkte (Bestandsregelung) oder indirekte (Plandurchlaufzeiten) Maßnahmen kann die Durchlaufzeit relativ einfach beeinflusst werden. Jedoch ist zu beachten, dass sich der Bestand nicht beliebig weit reduzieren lässt, da es sonst zu Auslastungseinbußen bei Personal und Maschinen kommen kann (siehe auch Kapitel "Dilemma der Ablaufplanung").[98]

[95] Großklaus, 1996, S. 64
[96] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 28
[97] Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 29
[98] Lödding, 2008, S.55

2.3.4 Auftrags - Durchlaufdiagramm

Die vorangegangenen Erläuterungen beziehen sich auf ein Arbeitssystem, welches von mehreren Aufträgen durchlaufen werden (Ressourcensicht). Alternativ kann man auch einen Auftrag betrachten, welcher mehrere Systeme (Arbeitsstationen) bis zu seiner Fertigstellung durchläuft (Auftragssicht). Dies entspricht der Aneinanderreihung der Durchlaufelemente des betrachteten Auftrages an den jeweiligen Arbeitsstationen bis zu seiner Fertigstellung. [99] Abbildung 18 zeigt eine kombinierte Darstellung, aus welcher sich der Belegungsplan gemäß dem vorigen Abschnitt sowie die Auftragsdurchlaufzeit ZDA_i der Aufträge 1 bis 6 ablesen lassen:

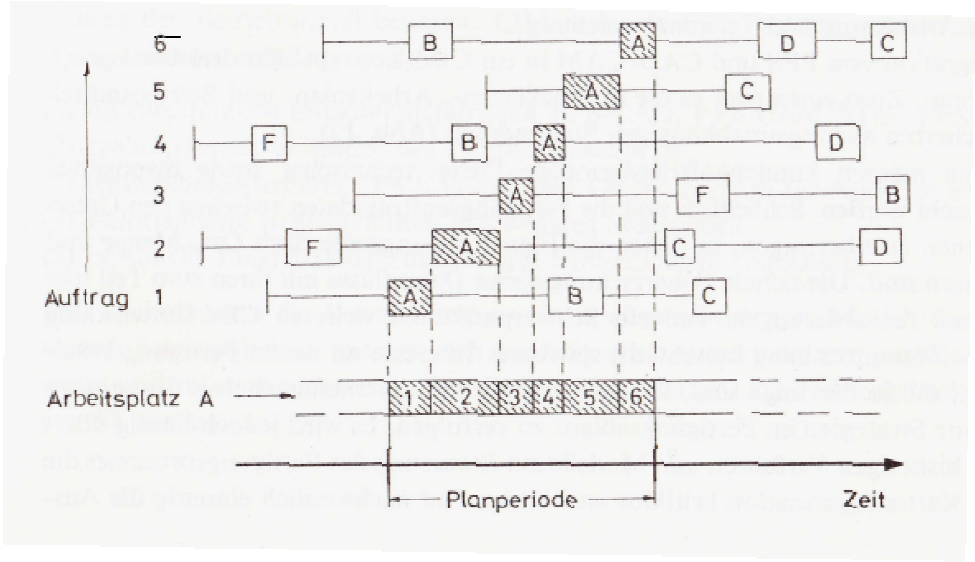


Abbildung 18 Ressourcen- vs. Auftragssicht[100]

2.3.5 Little´s Gesetz

Das Gesetz von Little liefert einen weiteren, sehr wichtigen Zusammenhang, nämlich jenen zwischen Durchlaufzeit, Ankunftsrate und der Anzahl der im System befindlichen Aufträge. Es wird zuweilen als das "F = m*a" der Produktionswissenschaft bezeichnet und wird formelmäßig folgendermaßen geschrieben: [101]

$$ZDL = \frac{N_s}{r_a} \qquad \textbf{(2.16)}$$

ZDL ... $Durchlaufzeit\ [BKT]$
N_s ... $Anzahl\ Aufträge\ im\ System\ [-]$
r_a ... $Ankunftsrate\ [1/BKT]$

[99] Wiendahl, 1987, S. 63 ff.
[100] Quelle: Kistner, 1990, S.52
[101] Hopp/Spearman, 2001, S.225

Das Gesetz von Little besagt also, dass bei einem Bediensystem im Gleichgewicht die Durchlaufzeit (Verweilzeit) eines ankommenden Auftrages in direktem Zusammenhang mit der Länge der Warteschlange an diesem System steht.[102] Die Ankunftsrate entspricht dabei dem Durchsatz (Throughput) des Systems (da schließlich für die Auslastung u < 1 gelten muss). Dies gilt natürlich nur, wenn kein Ausschuss in der Produktion auftritt, was jedoch in dieser Arbeit durchwegs angenommen werden soll. Damit lässt sich obige Gleichung auch folgendermaßen schreiben:[103]

$$ZDL = \frac{WIP}{TH} \qquad \textbf{(2.17)}$$

WIP $work\ in\ progress\ (= Anzahl\ der\ Aufträge\ im\ System)\ [-]$
TH $throughput\ (= Durchsatz)\ [1/Std]$

Im englischsprachigen Raum ist dies die gängige Schreibweise für Little´s Gesetz, welche auch in Bezug auf eine Produktionsumgebung sehr anschaulich ist, da der Durchsatz leicht am Ende des Arbeitssystems gemessen werden kann (= Output im betrachteten Zeitraum) und in der Regel als Vorgabewert fungiert.

Um die Vergleichbarkeit von Little´s Gesetz mit der Trichterformel zu erleichtern, sollen an dieser Stelle einige schlüssige Umformungen und Ersetzungen vorgenommen werden. Die Anzahl der Aufträge in einem Arbeitssystem kann auch als Auftragsbestand (in Anzahl Aufträge) aufgefasst werden. Weiters kann die mittlere Leistung L_m mit dem Produkt aus Leistung einer Maschine und Anzahl parallel arbeitender Maschinen innerhalb einer Arbeitsstation gleichgesetzt werden. Mit der Definition der mittleren Leistung einer Maschine[104]

$$U_m = \frac{r_a * ZAU_m}{m} \qquad \textbf{(2.18)}$$

U_m $mittlere\ Leistung\ einer\ Maschine\ [-]$
ZAU_m $mittlerer\ Arbeitsinhalt\ der\ bearbeiteten\ Aufträge[Std]$
m $Anzahl\ paralleler\ Maschinen$

folgt durch Ersetzen von N_S mit der Anzahl der Aufträge und deren Arbeitsinhalt:

$$ZDL_{vir} = \frac{BA_m * ZAU_m}{L_m} \qquad \textbf{(2.19)}$$

BA_m $Bestand\ (Anzahl\ Aufträge)\ [1]$
L_m $mittlere\ Leistung(= U_m{*}m)\ [Std/BKT]$

[102] Bornhäuser, 2009, S. 41
[103] Hopp/Spearman, 2001, S. 223
[104] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 33ff

***Anmerkung**: Nyhuis und Wiendahl verwenden in ihrem Buch "Logistische Kennlinien" an dieser Stelle anstatt der mittleren Durchlaufzeit den Begriff virtuelle Durchlaufzeit, um den Unterschied zur mittleren Durchlaufzeit nach der Definition über die Trichterformel, welche sich als arithmetischer Mittelwert der Einzeldurchlaufzeiten begreift, hervorzuheben. Dieser Notation soll in dieser Arbeit nur in diesem Abschnitt gefolgt werden, da in weiterer Folge Little´s Gesetz und die Warteschlangentheorie die Grundlage der Systembeschreibung bildet und die Definition der mittleren Durchlaufzeit an einem Arbeitssystem über die Trichterformel dabei keine Rolle mehr spielt.*

Zusätzlich zu der obigen Definition der Leistung einer Arbeitsstation lässt sich diese auch als das Produkt aus mittlerem Arbeitsinhalt ZAU_m und der mittleren Anzahl an abgefertigten Aufträgen pro Betriebskalendertag ausdrücken:[105]

$$L_m = ZAU_m * LA_m \qquad \textbf{(2.20)}$$

$LA_m \quad Mittlere\ Anzahl\ abgefertigte\ Aufträge\ [1]$

Durch Einsetzen der Gleichung (2.20) in Gleichung (2.19) folgt schließlich

$$ZDL_{vir} = \frac{BA_m}{LA_m} \qquad \textbf{(2.21)}$$

Diese Beziehung ergibt sich unmittelbar aus Gleichung (2.16), wenn vorausgesetzt wird, dass die Ankunftsrate r_a gleich der Abfertigungsrate LA_m ist (siehe dazu auch Kapitel 5) und entspricht auch exakt Gleichung (2.17).

Es ist sofort ersichtlich, dass Little´s Gesetz eine gewisse Ähnlichkeit mit der Trichterformel aufweist, nämlich dass eine Zeitgröße (in diesem Fall die Durchlaufzeit, in der Trichterformel die Reichweite) von dem Verhältnis einer Bestandsgröße (Anzahl Aufträge bei Little, Auftragsbestand in Stunden in der Trichterformel) zur Leistung (Durchsatz bei Little, mittlere Leistung in der Trichterformel) abhängig ist. [106]

Der wesentliche Unterschied der beiden Modelle liegt in der Dynamik und damit im Anwendungsbereich. Nyhuis und Wiendahl formulieren dies folgendermaßen: "*Die Trichterformel besagt, wie lange es durchschnittlich dauert, bis bei gleichbleibender mittlerer Leistung der Bestand am Arbeitssystem vollständig abgearbeitet ist, sofern zwischenzeitlich kein neuer Auftrag zugeht. Little's Law hingegen zeigt auf, welche Zeit ein neu am*

[105] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 33ff
[106] vgl. Hopp/Spearman, 2001, S. 225

Arbeitssystem ankommender Auftrag bis zu seiner Abfertigung im Mittel verweilen muss."[107] Dieser Unterschied wird - neben unterschiedlicher Dimensionsangaben - vor allem in der Beeinflussbarkeit der Kennzahlen durch das Abfertigungsverhalten ersichtlich. Eine Änderung der Auftragsreihenfolge (Aufträge mit unterschiedlicher Auftragszeit) macht sich bei Little´s Gesetz in Auftragsbestand und Durchlaufzeit bemerkbar, während sich die Trichterformel davon völlig unbeeindruckt zeigt.[108] Im Folgenden soll allerdings immer die FIFO- bzw. FCFS- Regel (First In First Out, First Come First Served) angewandt werden, bei welcher die Aufträge in festgelegter und unveränderlicher Reihenfolge durch die Produktion geschoben werden.[109] Die Diskussion in Abschnitt 2.4.5 zeigt jedoch noch weitere wesentliche Unterschiede der beiden Konzepte auf.

Little´s Gesetz und die Trichterformel dienen zwei grundlegend unterschiedlichen Denkweisen in der Modellierung, welche sich im Kern durch verschiedene Beschreibungen für den zeitlichen Fortgang des Systems gegeneinander abgrenzen lassen. Das Aufeinanderfolgen verschiedener Systemzustände wird in der einen Sichtweise (basierend auf Little´s Gesetz) durch das Auftreten von so genannten Ereignissen begründet, weshalb diese Sichtweise hier „ereignisorientiert" genannt wird. In der anderen Sichtweise wird der Fortgang des Systems durch einen Gradienten beschrieben, welcher in der Regel durch die aktuellen Werte der Zustandsvariablen selbst beeinflusst wird. In diesem Zusammenhang wird oft vom Fluss einer bestimmten Größe gesprochen, daher wird diese Sichtweise „flussorientiert" genannt. Als Beispiel kann die Vorstellung eines mit Wasser gefüllten Trichters dienen.[110]

2.4 Produktionskennlinien

Das Trichtermodell, das Durchlaufdiagramm und die damit ermittelten Kennzahlen beschreiben jeweils einen stationären Zustand im System. Diese Zustände lassen sich verdichtet in einem Diagramm in Form von Produktionskennlinien darstellen. Dabei gibt es drei wesentliche Betriebsbereiche:[111]

- Unterlastbereich, welcher sich durch ein geringes Bestandsniveau auszeichnet, woraus eine relativ geringe Auslastung und kurze Durchlaufzeiten resultieren;
- Übergangsbereich, welcher sich durch eine relativ hohe Auslastung und proportional mit dem Bestand steigender Durchlaufzeit kennzeichnet;
- hohes Bestandsniveau (Überlastbereich), in welchem nahezu Vollauslastung erreicht wird, was jedoch zu sehr hohen Durchlaufzeiten (Staus) führt

[107] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 35
[108] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 36
[109] Erlach, 2010, S. 188
[110] Nyhuis, 2008, S. 112
[111] vgl. Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 36 ff.

In der folgenden Abbildung sind die wesentlichen Leistungs- und Zeitgrößen über dem Bestandsniveau aufgetragen und die drei Bereiche gekennzeichnet:

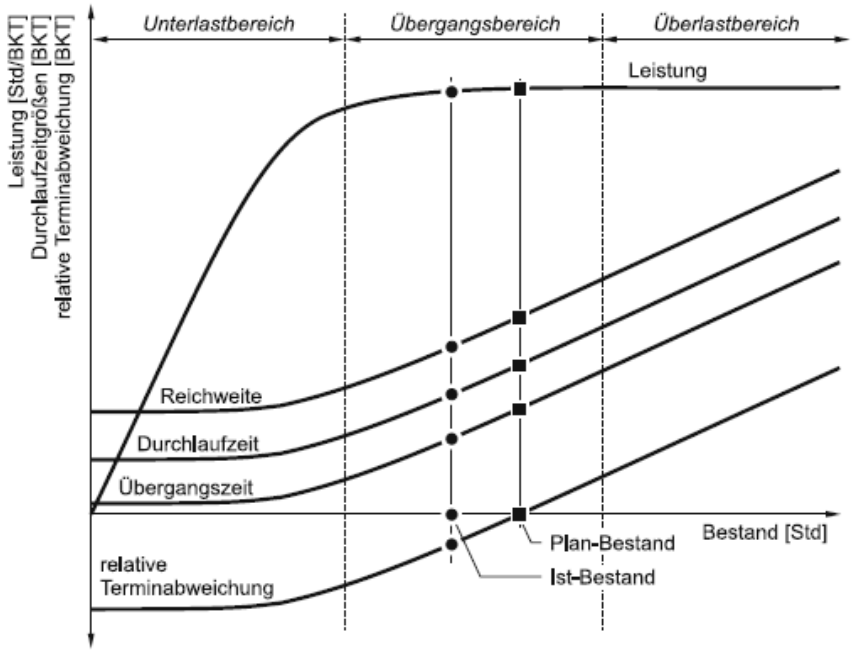


Abbildung 19: Produktionskennlinien[112]

Es ist sofort ersichtlich, dass sich ab einem bestimmten Bestandsniveau die Leistung des Systems nur noch unwesentlich ändert, wobei die Durchlaufzeit trotzdem stetig weiter ansteigt. Andererseits verharrt die Durchlaufzeit bei starker Reduzierung des Bestandes auf einem sich durch minimale Durchführungszeit und evtl. Transportzeiten ergebenden Minimalwert. Die Leistung sinkt dabei sehr stark ab, das bedeutet, die Kapazitäten des Systems werden bei weitem nicht mehr voll ausgenützt.[113]

Produktionskennlinien lassen sich grundsätzlich mittels drei verschiedener Modellansätze erstellen[114]:

- Kennlinientheorie, welcher die Trichterformel zugrundeliegt
- Warteschlangentheorie in Verbindung mit Little´s Gesetz, und
- Simulation, welche aber aufgrund der überwiegend experimentellen Natur hier nur kurz behandelt werden soll, jedoch im Praxisteil Anwendung findet

Die unterschiedlichen Modellierungsansätze besitzen ihre Stärken in der Behandlung verschiedener Aspekte des Produktionsablaufes. Daher ist es wichtig, für die aktuelle Fragestellung die richtige Methode auszuwählen. Eine grundsätzliche Gegenüberstellung der

[112] Quelle: Lödding, 2008, S. 60
[113] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 37
[114] Nyhuis, 2008, S.189 ff.

Ansätze wird von Nyhuis in seinem Werk "Beiträge zu einer Theorie der Logistik" vorgenommen:

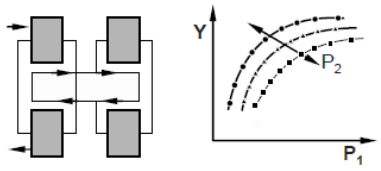
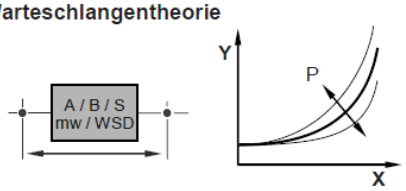
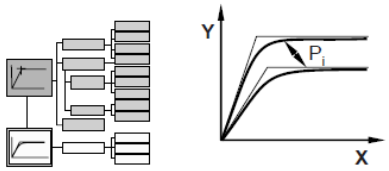
Modellierungsansatz	Vorteile	Nachteile
Simulation 	+ geringer Erstellungsaufwand + Modelladaption möglich + Einzelereignisse beschreibbar + hohe Akzeptanz	- Modellgültigkeit lässt sich nur punktuell nachweisen - Neuaufbau des Modells für jeden Anwendungsfall erforderlich - Übertragbarkeit der Ergebnisse in der Regel nicht möglich - hoher Anwendungsaufwand
Warteschlangentheorie 	+ Modellstruktur und -parameter sind aus elemantaren Gesetzmäßigkeiten abgeleitet + geringer Anwendungsaufwand	- Modelladaption nicht bzw. nur in engen Grenzen möglich - Beschreibungsgrößen teilweise nicht praxisgerecht - Beschränkung auf Ressourcensicht
Kennlinientheorie 	+ Modellstruktur und -parameter sind überwiegend aus elementaren Gesetzmäßigkeiten abgeleitet + geringer Anwendungsaufwand + Modelladaption in Grenzen möglich	- Beschränkung auf Ressourcensicht

Abbildung 20: Modellierungsansätze zur Erstellung von Produktionskennlinein[115]

Die Ansätze unterscheiden sich also sowohl hinsichtlich ihrer Abbildungsgüte wie auch des zur Erstellung erforderlichen Zeitaufwandes wesentlich.[116] Abbildung 21 zeigt eine Einteilung hinsichtlich dieser beiden Eigenschaften:

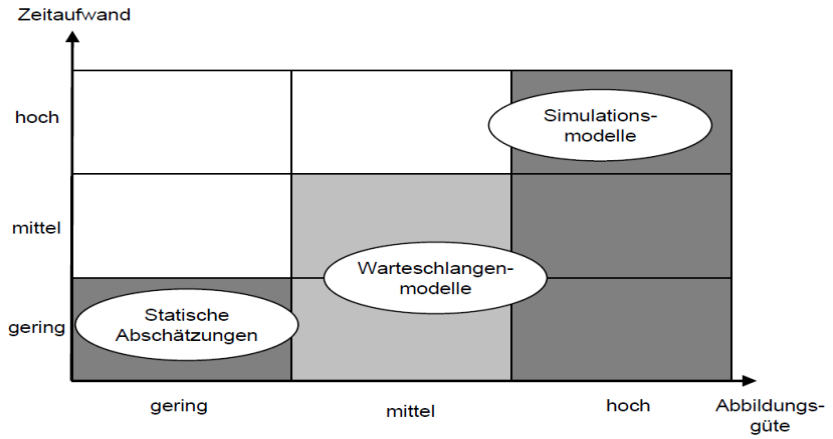


Abbildung 21:verschiedene Ansätze zur Abbildung von Produktionsabläufen[117]

Im Folgenden soll die Entstehung von Produktionskennlinien ausgehend von den beiden analytischen Ansätzen kurz beschrieben werden und ihre Eignung für die aktuelle Fragestellung überprüft werden.

[115] Quelle: Nyhuis, 2008, S. 190
[116] Nyhuis, 2008, S. 189 ff.
[117] Quelle: Fritz, 2007, S. 54

2.4.1 Erstellung von Produktionslinien mittels der Kennlinientheorie

Die Kennlinientheorie ist ein in der Praxis viel bewährter Lösungsansatz des "Dilemmas der Ablaufplanung".[118] Sie wurde über Jahre hinweg am Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Universität Hannover entwickelt. Die darauf aufbauende Berechnung von Produktionskennlinien geht auf Nyhuis zurück. Sie ermöglicht eine Visualisierung der Zusammenhänge der im Trichtermodell enthaltenen Größen abhängig vom Bestand.[119] Die Basis der Kennlinienermittlung bildet ein deduktiv- experimenteller Modellierungsansatz. Dem deduktiven (abstrahierenden) Modellanteil liegt die Annahme eines idealen Produktionsprozesses zugrunde, welcher durch folgende Bedingungen gekennzeichnet ist:[120]

- Es befindet sich zu jedem Zeitpunkt genau ein Auftrag an jedem Arbeitssystem (Auslastung aller Arbeitssysteme = 100%)
- Ein Auftrag wird unmittelbar nach seinem Zugang bearbeitet (Übergangszeit ZUE = 0)

Unter diesen Annahmen lässt sich ein ideales Durchlaufdiagramm abbilden:

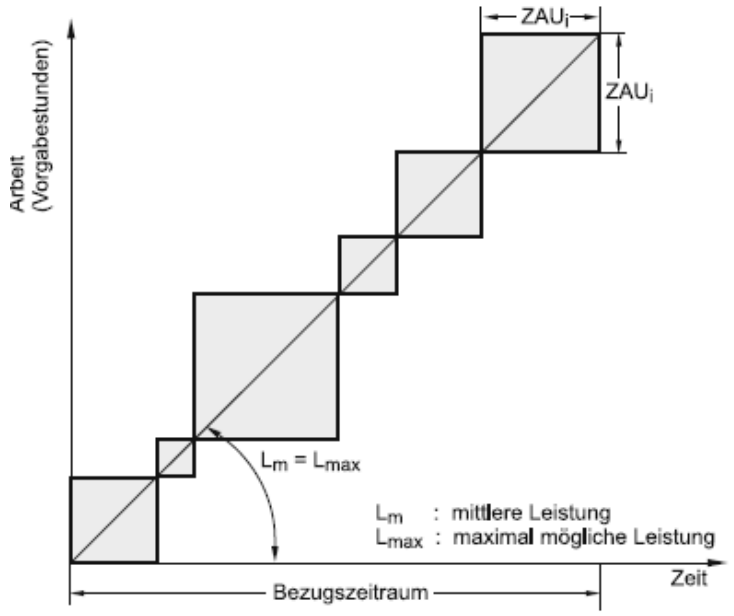


Abbildung 22 Idealisiertes Durchlaufdiagramm[121]

Für einen solchen idealisierten Prozessverlauf lässt sich ein idealer Bestandswert errechnen. Durch die obigen Bedingungen kann die Bearbeitungszeit ZDF (= ZDL, weil ZUE = 0) dem Arbeitsinhalt (ZAU) gleichgesetzt werden, wodurch sich bei gleicher Skalierung der Achsen (in Stunden) die Durchlaufelemente als Quadrate darstellen lassen und sich der Bestand am System zu

[118] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 38
[119] Lödding, 2008, S. 59
[120] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 62
[121] Quelle: Lödding, 2008, S. 65

$$BI_{min} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(ZAU_i * ZAU_i)}{\sum_{i=1}^{n} ZAU_i} \quad \textbf{(2.22)}$$

BI_{min} *idealer Mindestbestand*
ZAU_i *Arbeitsinhalt des Auftrages i*
n *Anzahl der das System durchlaufenden Aufträge*

ergibt.[122] Dieser Bestand wird als idealer Mindestbestand bezeichnet und bildet den Ausgangswert aller weiterer Berechnungen.[123] Diese Gleichung lässt sich unter Verwendung der Definitionen für Standardabweichung und Mittelwert der Auftragszeit so umformen, dass sich der Mindestbestand über Verteilungsparameter ausdrücken lässt.[124]

$$BI_{min} = ZAU_m * (1 + ZAU_v{}^2) \quad \textbf{(2.23)}$$

ZAU_m *mittlere Auftragszeit (Arbeitsinhalt gemittelt über alle n Aufträge) [Std]*
ZAU_v *Variationskoeffizient der Auftragszeiten [-]*

Im nächsten Schritt wird die maximal mögliche Leistung des Systems definiert. Deren Ermittlung wurde bereits in Abschnitt 2.2.3 beleuchtet. Mithilfe des Mindestbestandes und der maximalen Leistung lässt sich schließlich die ideale Kennlinie der ersten relevanten Zeitgröße, der Mindestreichweite, ermitteln. Analog zur Trichterformel ergibt sich[125]

$$R_{min} = \frac{BI_{min}}{L_{max}} \quad \textbf{(2.24)}$$

R_{min} *Reichweite des Idealprozesses*

Da in der Praxis die den idealen Kennlinien zugrundegelegten Voraussetzungen nicht gegeben sind, weichen die realen Kennlinien oft stark von den idealen ab. Daher wurden in Simulationen Betriebspunkte erzeugt, welche sodann zu einer Linie verbunden wurden. Dabei wurde festgestellt, dass die reale Leistungskennlinie vor allem im Abknickpunkt der idealen Kennlinie (Übergangsbereich) wesentlich von dieser abweicht.[126]

Der experimentelle Anteil des Modells besteht daher darin, die aufgrund des idealen Prozesses ermittelten Produktionslinien mit den simulativ ermittelten Kennlinien zu vergleichen (siehe Abbildung 23). Dieser Vergleich ergab, dass die idealen Produktionslinien ein geeignetes Bezugssystem für die realen Kennlinien darstellen. Die Abweichungen der idealen von den simulierten Kennlinien sind im Prinzip von denselben Größen abhängig wie

[122] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 63
[123] Lödding, 2008, S. 60
[124] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 64
[125] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 68
[126] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.70

die ideale Kennlinie selbst.[127] Dadurch konnten unter Einbeziehung der sogenannten C_{Norm} - Funktion die Einflüsse, welche diese Abweichungen verursachen, quantifiziert und unter dem Streckfaktor α zusammengefasst werden.

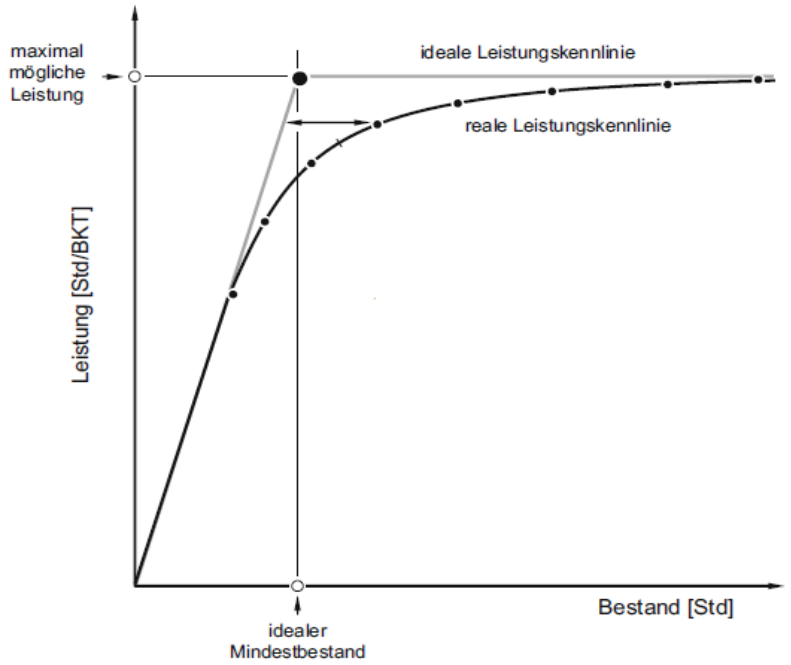


Abbildung 23: ideale vs. reale Leistungskennlinie[128]

Mithilfe dieses Faktors und den mittels der C_{Norm} - Funktion (mit C = 0,25) ermittelten Parameter x und y sowie einer Laufvariablen t (0 < t < 1) konnten Näherungsgleichungen zur Bestimmung der realen Kennlinien entwickelt werden. Die Variablen x und y werden im Weiteren durch ihre produktionslogistischen Entsprechungen ersetzt, also dem Mindestbestand und der maximal möglichen Leistung. Damit ergeben sich die Gleichungen[129]

$$B_m(t) = BI_{min} * \left(1 - \left(1 - \sqrt[4]{t}\right)^4\right) + BI_{min} * \alpha * t \qquad \textbf{(2.25)}$$

$B_m(t)$ $mittlerer\ Bestand\ [Std]$
α $Streckfaktor\ [-]$
t $Laufvariable\ [1]$

und

$$L_m(t) = L_{max} * \left(1 - \left(1 - \sqrt[4]{t}\right)^4\right) \qquad \textbf{(2.26)}$$

$L_m(t)$ $mittlere\ \ Leistung$

[127] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 70
[128] Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 70
[129] vgl. Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 62 ff. für genauere Ausführungen

Im nächsten Schritt wird zunächst der Klammerausdruck in Gleichung (2.26) in die bestandsabhängige Auslastung $A_m(t)$ überführt,

$$A_m(t) = \frac{L_m(t)}{L_{max}(t)} * 100 \qquad \textbf{(2.27)}$$

$A_m(t) \quad mittlere\ Auslastung\ [\%]$

und in Folge diese Beziehung nach t aufgelöst,

$$t = (1 - \sqrt[4]{1 - \frac{A_m}{100}})^4 \qquad \textbf{(2.28)}$$

sodass sich schließlich der Bestand als Funktion der Auslastung A_m

$$B_m(A_m) = BI_{min} * \frac{A_m}{100} + BI_{min} * \alpha * (1 - \sqrt[4]{1 - \frac{A_m}{100}})^4 \qquad \textbf{(2.29)}$$

bzw. als Funktion der mittleren Leistung L_m

$$B_m(L_m) = BI_{min} * \frac{L_m}{L_{max}} + BI_{min} * \alpha * (1 - \sqrt[4]{1 - \frac{L_m}{L_{max}}})^4 \qquad \textbf{(2.30)}$$

ausdrücken lässt. Für den Wert von α hat sich dabei in einer Werkstattfertigung ein Wert von 10 bewährt. Nur unter speziellen Bedingungen wählt man dafür einen höheren bzw. niedrigeren Wert (eine Diskussion dazu findet sich im praktischen Teil in Abschnitt 5.4.5 und Abschnitt 5.6.5). [130] Zur Berechnung der Kennlinie für die mittlere Reichweite lässt sich wieder die Trichterformel (Gleichung (2.15)) anwenden:

$$R_m(t) = \frac{B_m(t)}{L_m(t)} \qquad \textbf{(2.31)}$$

$R_m \qquad mittlere\ Reichweite\ [BKT]$

Die Kennlinie der mittleren Durchlaufzeit verläuft - unter Voraussetzung einer auftragszeitunabhängigen Abarbeitungsreihenfolge (z.B. FIFO) - parallel zur

[130] vgl. Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 98 ff.

Reichweitenkennlinie, der Abstand ergibt sich durch Mittelwert und Streuung der Durchführungszeit.[131]

$$ZDL_m(t) = R_m(t) - ZDF_m * ZDF_v^2 \qquad \textbf{(2.32)}$$

$ZDL_m(t)$ $\quad mittlere\ Durchlaufzeit[BKT]$

Die Übergangszeit schließlich ergibt sich gemäß Gleichung (2.12) zu

$$ZUE_m(t) = ZDL_m(t) - ZDF_m \qquad \textbf{(2.33)}$$

$ZUE_m(t)$ $\quad mittlere\ Übergangszeit\ [BKT]$

Schließlich lassen sich die Kennlinien der Leistungsgrößen gemeinsam in einem Kennliniendiagramm darstellen:

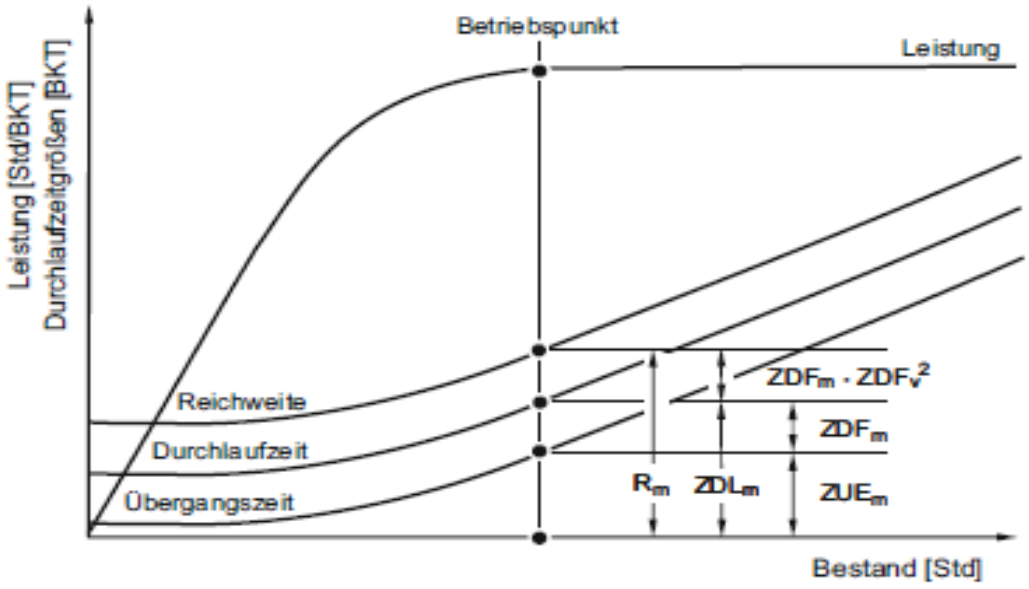


Abbildung 24 Produktionskennlinien (ermittelt mit der Kennlinientechnik)[132]

Bei dieser Darstellung wurde eine FIFO- Bearbeitung unterstellt. Werden andere Reihenfolgeregeln angewandt, so ändert sich die Steigung der Durchlaufzeit- sowie der Übergangszeitkennlinie (vgl. Abschnitt 2.3.5). Dieser Effekt wird dabei umso größer, je stärker die Arbeitsinhalte der Aufträge streuen.[133]

[131] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.69 & S. 85
[132] Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.84
[133] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.88

2.4.2 Erstellung von Produktionskennlinien mittels der Warteschlangentheorie

***Anmerkung**: In diesem Abschnitt soll die prinzipielle Vorgehensweise bei der Ermittlung der Betriebskennlinien über die Warteschlangentheorie und Little´s Gesetz erörtert werden. Eine Berechnung wie in Abschnitt 2.4.1 soll hier nicht vorgenommen werden, damit wird sich Kapitel 3 detailliert beschäftigen.*

Als Grundlage der Warteschlangentheorie dienen die von Erlang zuerst im Telefonwesen gewonnenen und beschriebenen Erkenntnisse.[134] Diese wurden bald auch auf die Produktionswelt übertragen und dort eingesetzt. Die Grundüberlegung besteht darin, einen Arbeitsplatz als Bedienstation (Server) und die eintreffenden Aufträge als Kunden anzusehen. In diesem System (= Arbeitsplatz) gibt es nur zwei relevante Ereignisse, nämlich die Ankunft eines neuen Auftrags und das Prozess- bzw. Bedienende eines bearbeiteten Auftrags. Beim Ankunftsereignis wird der Auftrag sofort bearbeitet, wenn die Station frei ist, sonst wird er am Ende des Puffers abgelegt (gelangt in die Warteschlange). Sobald die Bedienung eines Auftrags beendet ist, wird - unter Voraussetzung einer FIFO- Bedienung - der am längsten wartende Auftrag (der erste in der Warteschlange) aus dem Puffer geholt und (nach einer eventuellen Rüstzeit) bearbeitet.[135]

Das im Allgemeinen stochastische Ankunfts- und Abfertigungsverhalten an der Station lässt sich durch aus der Statistik bekannte Verteilungsformen beschreiben. Dabei sind jeweils Mittelwert und Streuung die wesentlichen Parameter.[136] Mithilfe der Definition dieser Größen ist es möglich, die Abhängigkeiten zwischen zwei logistischen Zielgrößen zu beschreiben (den Zusammenhang zwischen Wartezeit und Auslastung der Station). Die genaue Vorgehensweise hierzu wird in Kapitel 3 beschrieben.

Zur Erstellung von Produktionskennlinien ist es notwendig, analog zur Vorgehensweise in 2.4.1 zusätzlich zu der Leistungsgröße (Auslastung) und der Zeitgröße (Ankunftszeiten, Bedienzeiten, Wartezeit) noch eine Bestandsgröße zu definieren. Dazu bedient man sich des Gesetzes von Little.[137] Unter Verwendung dieses Gesetzes und der Gleichungen (2.16) bis (2.21) lassen sich schließlich die gesuchten Beziehungen zwischen dem mittleren Bestand (in Anzahl Aufträgen), der Durchlaufzeit und der Auslastung des Arbeitssystems darstellen. Wählt man nun analog zur Vorgangsweise der Kennlinientheorie den Bestand als Bezugsgröße, so lassen sich die beiden anderen Größen in Form von Kennlinien auftragen.[138] Dabei wird zum Zwecke des Vergleichs verschiedener Modellansätze als Zeitgröße oft anstatt

[134] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.41
[135] März et al., 2010, S. 14
[136] vgl. Zimmermann, 2001, S. 361 ff.
[137] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.46
[138] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.46

der Durchlaufzeit der Flussgrad (FG) verwendet, welcher sich als Quotient aus Durchlaufzeit und Durchführungszeit definiert.[139]

$$FG = \frac{ZDL}{ZDF} \qquad \textbf{(2.34)}$$

FG $Flussgrad\ [-]$
ZDL $Durchlaufzeit\ [Std]$
ZDF $Durchführungszeit\ [-]$

Die Verläufe des Flussgrades sowie der Auslastung lassen sich nun über dem Bestand auftragen. Abbildung 25 zeigt ein auf diese Weise ermitteltes Diagramm (den hier gezeigten Kennlinien liegt ein M|G|1- Modell zugrunde):

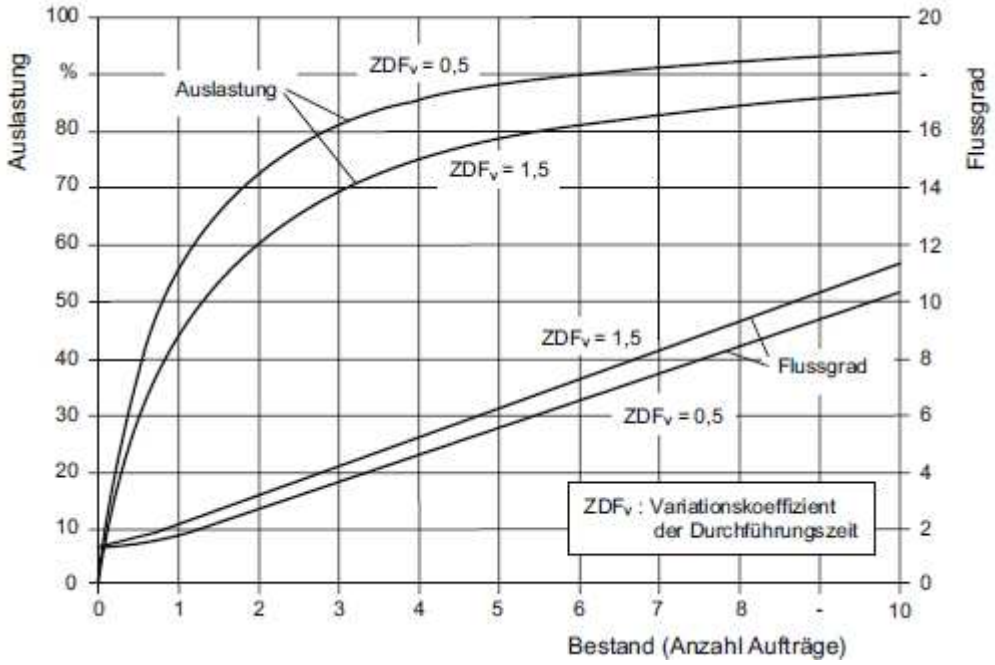


Abbildung 25 Kennlinien (ermittelt anhand eines Warteschlangenmodells)[140]

Zu beachten ist, dass sich bei der Warteschlangentheorie der Berechnungsablauf der drei wesentlichen Größen grundsätzlich von jenem der Kennlinientheorie unterscheidet. Während in der Kennlinientheorie zuerst der (mittlere) Bestand ermittelt wird und davon ausgehend die Auslastung (mittlere Leistung) und die Zeitgrößen (mittlere Reichweite, Durchlaufzeit) berechnet werden, ergeben sich in der Warteschlangentheorie der Bestand und die Durchlaufzeit gleichermaßen als Funktion der Auslastung. Weitere Erläuterungen zu den unterschiedlichen Ansätzen finden sich in der in Abschnitt 2.4.5 durchgeführten Diskussion.

[139] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.44
[140] Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 47

2.4.3 Vereinheitlichung der Darstellung

Wie geschildert, lassen sich die Leistungs- und Zeitgrößenkennlinien auf zwei verschiedene Arten erzeugen. Jedoch ist die Bestandsachse in den beiden Fällen unterschiedlich skaliert. Die beiden Bestandsgrößen (Anzahl Aufträge und mittlerer Bestand an Auftragsstunden) lassen sich jedoch im Allgemeinen ($ZAU_v > 0$) nicht einfach über die durchschnittliche Auftragszeit gleichsetzen:[141]

$$B_m(t) \neq BA_m(t) * ZAU_m \qquad \textbf{(2.35)}$$

Um dennoch einen Vergleich zwischen den Darstellungen zu ermöglichen, können die Bestandsgrößen folgendermaßen ineinander überführt werden[142]:

$$BA_m(t) = \frac{B_m(t)}{ZAU_m} - \frac{A_m(t) * {ZAU_v}^2}{100} \qquad \textbf{(2.36)}$$

bzw.

$$B_m(t) = \left(BA_m(t) + \frac{A_m(t) * {ZAU_v}^2}{100}\right) * ZAU_m \qquad \textbf{(2.37)}$$

Nyhuis und Wiendahl nennen diesen Schritt "Synthese der Kennlinientheorie mit Little´s Law", was in dieser Arbeit allerdings nur in Hinsicht auf die Dimensionierung des Bestandes bestätigt werden kann, in ihrer Aussagekraft unterscheiden sich die beiden zugrundeliegenden Prinzipien (Trichterformel und Little´s Gesetz) zu sehr. So stellen z.B. auch Schömig et al. bei der Gegenüberstellung der beiden Herangehensweisen fest, dass allein formal keine inhaltliche Identität der beiden Methoden, also der Approximation über die Kennlinientheorie und der Warteschlangentheorie, besteht.[143]

Anmerkung: *An dieser Stelle soll auf die Erläuterungen zu normierten Darstellungsformen verzichtet werden, da sich diese nur für Operationen im Rahmen der logistischen Positionierung und langfristigen Produktionsplanung eignen, für arbeitssystembezogene Betrachtungsweisen mit der Forderung nach absoluten Kennzahlen sind diese nicht geeignet.*[144]

[141] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 85
[142] zur Herleitung siehe Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 93 ff.
[143] Schömig et al, 2006, S. 470
[144] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 92

2.4.4 Prozesskennlinien

Prozesskennlinien entstehen durch Aggregation der Produktionskennlinien von miteinander verbundenen Arbeitsstationen. Stellt man sich die Produktion als Netzwerk von miteinander durch den Materialfluss verbundene Trichter vor, können für jeden dieser Trichter die Beziehungen gemäß den vorhergehenden Abschnitten angewandt und so die entsprechenden Kennlinien erstellt werden.[145] Die Vorgehensweise wird im folgenden Bild veranschaulicht:

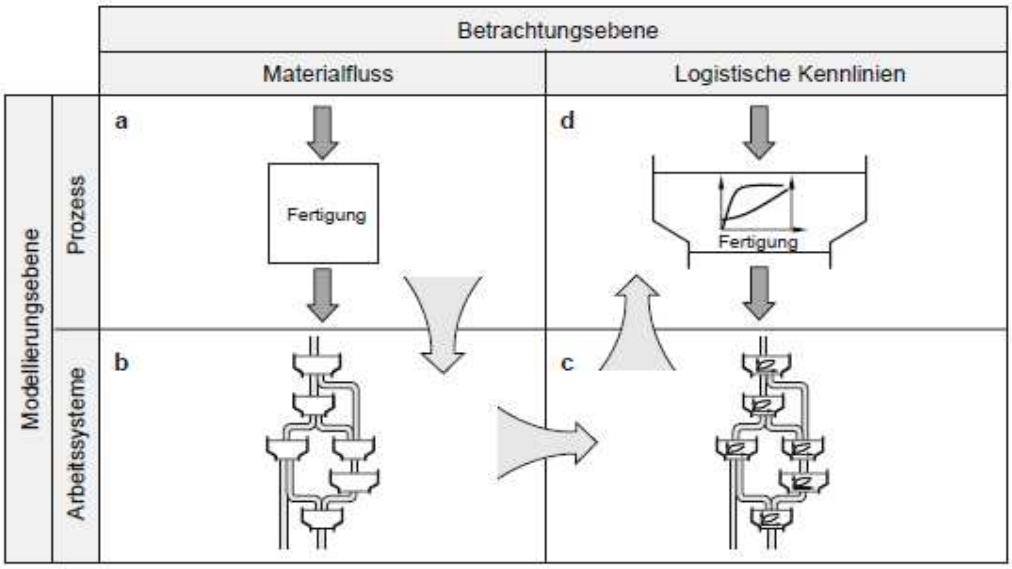


Abbildung 26: Erstellung von Prozesskennlinien[146]

Als Flussgröße zwischen den einzelnen Stationen wird hier die Anzahl zu - und abgehender Aufträge an den Stationen definiert, da sich aufgrund unterschiedlicher Bearbeitungsinhalte die Größe ZAU (also der Arbeitsinhalt eines Auftrages) hier nicht eignet. Die maximale Leistung einer Arbeitsstation L_{max} kann mithilfe der Beziehung (2.20) in die Dimension (Anzahl Aufträge/BKT) überführt werden, für den idealen Mindestbestand geschieht dies mittels der Gleichung (2.36). Somit lässt sich der ideale Mindestbestand für die Prozesskette, also die Produktionslinie bestehend aus K Stationen, angeben mit:

$$BIA_{min,PZK} = \sum_{i=1}^{K} \frac{\frac{LA_{max,EP}}{\ddot{u}_{EP}}}{\frac{LA_{max,i}}{\ddot{u}_i}} * BIA_{min,i} \qquad \textbf{(2.38)}$$

$BIA_{min,PZK}$	$idealer\ Mindestbestand\ der\ Prozesskette\ [-]$
$LA_{max,EP}$	$maximale\ Leistung\ des\ Engpasses\ [1/BKT]$
$LA_{max,i}$	$maximale\ Leistung\ der\ Arbeitsstation\ i\ [1/BKT]$
$BIA_{min,i}$	$idealer\ Mindestbestand\ an\ Station\ i\ [-]$
$\ddot{u}$	$Materialflusskoeffizient$

[145] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 111
[146] Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 111

Die maximale Leistung der Prozesskette ergibt sich als der Quotient aus maximaler Leistung des Engpasssystems und dem Materialflusskoeffizienten des Engpasses:

$$LA_{max,PZK} = \frac{LA_{max,EP}}{\ddot{u}_{EP}} \qquad \textbf{(2.39)}$$

$LA_{max,PZK}$ $\quad$ $maximale\ Leistung\ der\ Prozesskette\ [-]$

Die Bestands-, Leistungs- und Zeitkenngrößen lassen sich sodann wieder (durch entsprechende Ersetzungen) mit den Gleichungen (2.25) und (2.26) bzw. (2.29) und (2.30) sowie (2.21) ermitteln.

2.4.5 Diskussion der Modellansätze

Beide vorhin erläuterten Modellansätze weisen naturgemäß Vor- und Nachteile auf. Jedoch ist es bezüglich der aktuellen Aufgabenstellung von großer Bedeutung, den richtigen Ansatz zu wählen. Dazu sollen beide Verfahren genauer betrachtet werden.

Der Ansatz der Warteschlangentheorie wird allgemein sehr kritisch diskutiert. Vor allem wird dabei die Wirklichkeitsnähe des Modells aus verschiedenen Gründen infrage gestellt. Die häufigsten Kritikpunkte lauten:

- Das Modell verlangt verteilungsspezifische Voraussetzungen, welche in der Praxis häufig nicht bzw. nicht genau so anzutreffen sind.[147]
- Modellierungen mit der Warteschlangentheorie ergeben oftmals schlechtere Ergebnisse, als in der Praxis anzutreffen sind. So können selbst bei sehr hohen Beständen im System die Kapazitätsgrenzen der Stationen nie erreicht werden, das bedeutet, eine Vollauslastung ist nicht möglich.[148] Dies resultiert aus der zugrundeliegenden Formel für die Wartezeit, welche bei gegen 1 gehender Auslastung überproportional gegen Unendlich strebt.[149]
- Die Prämisse der Unabhängigkeit von Zugang und Abgang wird infrage gestellt, da schließlich durch die Produktionsplanung Abstimmungen in dieser Hinsicht erfolgen[150]. Dieser Kritikpunkt kann jedoch durch die Vorgehensweise gemäß Abschnitt 3.4.4 weitgehend entschärft werden.

Diese Kritikpunkte stellen vor allem eine Hürde im Denken der Anwender dar, da dadurch in keiner Weise die qualitative Richtigkeit der durch das Modell getroffenen Aussagen widerlegt werden kann. Allerdings ist die Bestimmung der Parameter, also die Verteilung

[147] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 48
[148] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 48
[149] Schömig et al, 2006, S. 468
[150] Großklaus, 1996, S. 38

von Ankunfts- und Abfertigungsprozessen, in der Praxis tatsächlich oft mit großem Aufwand verbunden und muss außerdem bei veränderten Bedingungen jedes Mal aufs Neue durchgeführt werden.[151] Ist dies jedoch geschafft, so lassen sich die Verhältnisse an einem Arbeitssystem mithilfe der Warteschlangentheorie in Verbindung mit Little´s Gesetz sehr genau abbilden.

Doch auch die Anwendung der Kennlinientheorie wird vielfach kritisch betrachtet. Vor allem bei der Bestimmung von Zeitgrößen-Kennlinien an den einzelnen Arbeitsplätzen sowie in Folge der gesamten Produktion weist die belastungsorientierte Auftragsfreigabe (auf welcher die Kennlinientheorie beruht) erhebliche Schwächen auf.[152] Häfner hat in seinem Werk "Ein Warteschlangenansatz zur integrierten Produktionsplanung" (1992) die wesentlichen Kritikpunkte sehr gut zusammengefasst, die an dieser Stelle daher nur kurz umrissen werden: [153]

- Es wird ein kontinuierlicher Materialfluss (mit konstanter Geschwindigkeit) durch die Arbeitsstationen angenommen. Dies erfordert jedoch beliebig teilbare Aufträge, was in der Praxis natürlich nur in den seltensten Fällen vorkommt.
- Die Streuung der Einzelbearbeitungszeiten beeinflussen den Materialfluss durch die Station. So können vereinzelte große Aufträge den Abgang an Arbeitsplätzen blockieren (siehe dazu Abschnitt 4.2.5). In der Kennlinientheorie werden nur die Mittelwerte der einzelnen Aufträge und ihre Abweichung von einem gemeinsamen Mittelwert berücksichtigt, nicht aber die Streuung der Bearbeitungszeiten innerhalb der Lose (vergleiche hierzu die Ausführungen in Kapitel 4.4).
- Die tatsächliche Auslastung einer Arbeitsstation wird nur ungenügend berücksichtigt. So erkennt man mithilfe der Warteschlangentheorie, dass die Durchlaufzeit eines Auftrags überproportional ansteigt, sobald sich die Auslastung dem Wert 1 nähert. In der Trichterformel wird jedoch nur die mittlere Leistung des Systems herangezogen, welche keine Aussage über den individuellen Auslastungsgrad während der Bearbeitung eines Auftrages liefert.
- Als Stellgröße wird in der Trichterformel der mittlere Bestand definiert, woraus sich die Zeitgrößen ergeben. Allerdings besteht zwischen DLZ und Bestand kein ursprünglicher Zusammenhang, sondern sind beide Größen in gleichem Maße von der Auslastung des Systems abhängig.[154]

Ein weiterer Kritikpunkt für die Anwendung der Kennlinientheorie ergibt durch die Approximation über die C_{NORM}- Funktion und den Streckfaktor α:

[151] Nyhuis, 2008, S. 190
[152] Vgl. Häfner, 1992, S. 89 ff.
[153] Häfner, 1992
[154] Zimmermann, 1988, S. 334

- Die richtige Wahl des Streckfaktors ist für die Planungsgenauigkeit von großer Bedeutung. Der Streckfaktor ist dabei vom C - Wert (welcher auf einer mathematischen Funktion beruht) und dem Verhältnis von idealem zu tatsächlichem Bestand abhängig. Diese beiden Werte sind jedoch nicht a priori bekannt, sondern können nur empirisch ermittelt werden. In der Kennlinientheorie wird diesbezüglich auf Erfahrungswerte zurückgegriffen, welche allerdings oft zu Ungenauigkeiten führen können (dieser Umstand wird in 5.4.5 und 5.6.5 noch näher beleuchtet).

Demgegenüber können die Verteilungsformen der Ankunfts- und Bearbeitungsprozesse statistisch erfasst und beschrieben werden, durch die Anwendung der in Kapitel 3 erläuterten Vorgehensweise lässt sich sodann die Plandurchlaufzeit ziemlich genau ermitteln.

2.5 Zusammenfassung der Theorie aus Kapitel 2

Zusammenfassend lässt sich in Bezug auf die gegenständliche Aufgabenstellung feststellen, dass sich die Kennlinientheorie, so anerkannt und verbreitet sie in der Produktionswelt auch sein mag, nicht besonders gut eignet. Es lassen sich damit vor allem prinzipielle Zusammenhänge und Abhängigkeiten abbilden, jedoch wird dabei den Dynamiken an den individuellen Arbeitsplätzen wenig Beachtung geschenkt. Vor allem die "*Annahme eines kontinuierlichen Materialflusses und beliebig teilbarer Aufträge kann in einer realen Werkstattsituation nicht aufrechterhalten werden*"[155] und wirkt sich bei der Bestimmung der Durchlaufzeit einzelner Aufträge sehr störend aus. Selbst Peter Nyhuis, einer der Schöpfer der Kennlinientheorie, räumt ein, dass sich "der Durchlauf einzelner Aufträge durch die Produktion" mit der Kennlinientheorie nicht abbilden lässt.[156] Aber auch die Kennlinie der mittleren Durchlaufzeit im Falle mehrerer unterschiedlicher Aufträge unterscheidet sich, wie im Praxisteil noch gezeigt werden soll, nicht unwesentlich in den Diagrammen der beiden unterschiedlichen Modellen. Die Kennlinientheorie besitzt ihre Stärken also vor allem in der Beschreibung von produktionsübergreifenden Zusammenhängen und im Vergleich unterschiedlicher Auftragsstrukturen. Deshalb wird sie auch bisher vornehmlich im Produktionscontrolling, im Rahmen der Fabrikplanung und zur (langfristigen) Steuerung der Auftragsfreigabe verwendet.[157] Zur Beschreibung der dynamischen Verhältnisse, welche durch den Durchlauf von unterschiedlichen Aufträge an einer Station bzw. in einer Produktionslinie zustande kommen, also in der kurzfristigen Ablaufplanung, ist der analytische Ansatz der Warteschlangentheorie wesentlich besser geeignet.[158]

[155] Häfner, 1992, S. 94
[156] Nyhuis, 2008, S. 191
[157] Kerner, 2002, S. 21
[158] Kumpf, 2001, S. 37

Daher soll ab dem nächsten Kapitel mit dem Modellansatz der Warteschlangentheorie weitergearbeitet werden, welcher in Verbindung mit dem Gesetz von Little eine relativ exakte Abbildung des Materialflusses und die damit verbundene Durchlaufzeitbestimmung in Abhängigkeit der Auftragsinhalte (Losgröße) ermöglicht. Es soll jedoch im Praxisteil anhand zweier Exkurse gezeigt werden, wie sich auch die Kennlinientheorie einsetzen lässt.

3 Modellierung des Materialflusses durch Wartesysteme

Wie im vorigen Kapitel erwähnt, setzt sich die Durchlaufzeit aus Übergangszeit und Durchführungszeit zusammen. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Übergangszeit den weitaus größten Anteil in Anspruch nimmt. Diese Übergangszeit besteht wie bereits dargestellt aus Transport sowie Liegezeit vor und nach der Bearbeitung. [159] Die Aufteilung der Durchlaufzeiten im Materialfluss ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

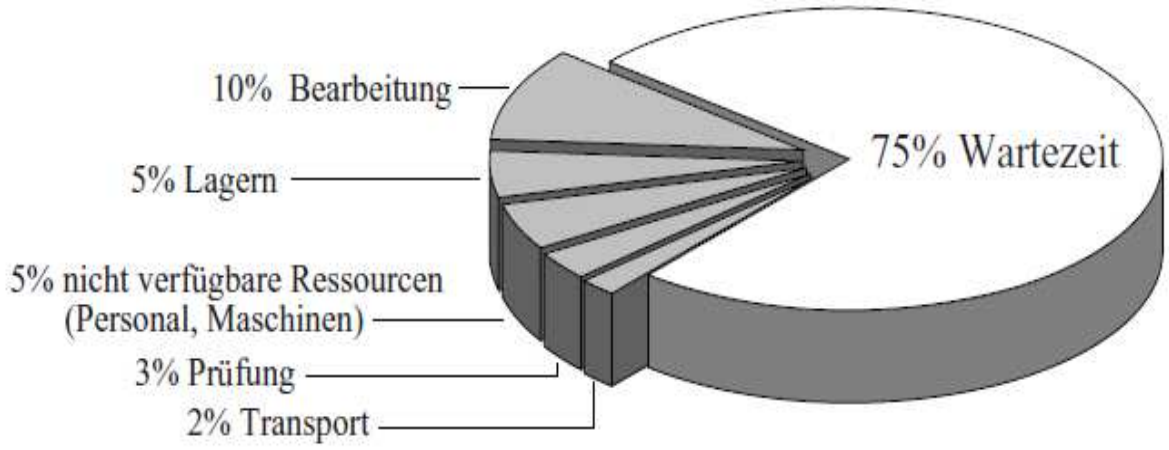


Abbildung 27: Bestandteile der Durchlaufzeit[160]

In dieser Grafik ist klar ersichtlich, dass die eigentliche Bearbeitungszeit (Durchführungszeit) zumeist nur etwa 10 Prozent der gesamten Durchlaufzeit ausmacht. Auch die geplante Zwischenlagerung und der Transport der Werkstücke nimmt nur einen sehr kleinen Teil der Gesamtdauer ein. Das bedeutet, dass die Werkstücke (bzw. die Lose) den Großteil der Zeit im Wartezustand, also als Bestand und damit gebundenem Kapital, verbringen.[161] Doch wie entsteht diese lange Wartezeit? Dieses Phänomen, welches auch bei gut organisierten Prozessen und Produktionslinien auftritt, lässt sich mit der Warteschlangentheorie erklären.

3.1 Grundlagen

In seinem Werk "Bestandsregelung als Basis für eine Neugestaltung von PPS- Systemen" liefert Dr. Hubert Missbauer die folgende Definition der Wartesystemtheorie: *"Unter dem Begriff Warteschlangentheorie werden alle analytischen Modelle subsumiert, die das dynamische Verhalten von Wartesystemen (als welche die Fertigungseinheiten betrachtet werden können) beschreiben. Analytische Modelle der Warteschlangentheorie dienen*

[159] Nyhuis, 2008, S. 192
[160] Quelle: VDI FML (2012), zitiert nach: Arnolld/Furmans, 2009
[161] Wiendahl, 1987, S.48 ff.

traditionellerweise (im Wesentlichen bis heute) der Bewertung alternativer Auslegungsvarianten von Systemen, die als Wartesysteme modelliert werden können. [....] Dabei besteht die Aufgabe darin, für den stationären Systemzustand die zu erwartenden Kenngrößen bzw. Leistungsmerkmale des Fertigungssystems zu berechnen bzw. abzuschätzen, und zwar nicht in Form qualitativer Aussagen, sondem als exakte Werte für Durchlaufzeiten, Bestande, Auslastungen usw." [162]

Nyhuis und Wiendahl definieren die Warteschlangentheorie folgendermaßen: "*Warteschlangenmodelle (waiting line models oder queuing models) ermöglichen es, die in der Realität auftretenden stochastischen Einflüsse bei der Planung und Steuerung realer Abläufe zu berücksichtigen [...]. Mit mathematischen Ansätzen soll bei bekannten Eingangsinformationen insbesondere hinsichtlich der durchschnittlichen Ankunfts- und Abfertigungsrate der Objekte am Bediensystem das reale Ablaufgeschehen theoretisch fassbar und somit vorhersehbar werden. Warteschlangenmodelle ermöglichen dabei im wesentlichen Aussagen über die wahrscheinlichen Zusammenhänge zwischen den Wartezeiten und den Warteschlangenlängen sowie der Auslastung der Bedienstation*." [163]

Das bedeutet, dass diese Theorie dem Betrachter Zusammenhänge zur Verfügung stellt, welche Aufschluss über die zu erwartende Übergangszeit an einer (bzw. mehreren) Station(en) liefert.

3.2 Die Ursache für Warteschlangen - Variabilität

"*Das Phänomen einer Warteschlange entsteht im Allgemeinen, wenn zu einem Zeitpunkt die Nachfrage nach einer Bedienung die verfügbare Kapazität übersteigt. Dies ist in der Praxis häufig anzutreffen, wenn z.B. Erzeugnisse auf die Bearbeitung in der nächsten Station warten. Ursache dafür ist meistens die Entstehung stochastischer Prozesse. Ihre Wirkungen auf das Systemverhalten können durch unterschiedliche mathematische Ansätze beschrieben werden, die in Warteschlangenmodellen dargestellt werden.*"[164]

Die Ursache für Warteschlangen liegt also in der Variabilität bzw. Variation (Unregelmäßigkeit) der Ankunfts- und Bedienprozesse an den Arbeitsstationen. Dabei ist diese Variabilität nicht mit Zufälligkeit zu verwechseln. Im Gegensatz zu zufälligen Erscheinungen kann man variable Ereignisse mittels Verteilungen (mit Mittelwert und Standardabweichung bzw. mit Erwartungswert und Wahrscheinlichkeit) beschreiben.[165]

[162] Missbauer, 1998, S. 85
[163] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 41
[164] Al Khateeb, 2013, S. 75
[165] Hopp/Spearman, 2001, S. 249

Hopp und Spearman fassen die wesentlichen Ursachen für unregelmäßige Prozesse folgendermaßen zusammen: [166]

- "Natürliche" Variabilität, welche kleinere Fluktuationen in den Prozesszeiten, verursacht durch unterschiedliche Bedienung, Maschinen und Material, beinhaltet
- zufällige Ausfallszeiten
- geplante Wartungsarbeiten
- Ressourcenverfügbarkeit (Personal)
- Nacharbeit an der Arbeitsstation

3.3 Variabilität im Materialfluss

Um Variabilität zu analysieren, bedient man sich der Werkzeuge der Statistik. Jede Verteilung wird im Wesentlichen durch Mittelwert und Streuung beschrieben. Die Varianz bzw. Streuung wird mit σ^2 beschrieben, die Wurzel daraus ergibt die Standardabweichung σ. Da sich dieses Kapitel mit Zeiten beschäftigt, soll der Mittelwert mit t beschrieben werden.

Der Mittelwert einer allgemeinen Reihe von n Messwerten ergibt sich zu

$$t = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n} \qquad \textbf{(3.1)}$$

t $Mittelwert$
t_i $Messwerte$
n $Anzahl\ Messwerte$

Die Standardabweichung einer Messreihe, bestehend aus n Messwerten und dem Mittelwert t, berechnet sich zu

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^{n} (t_i - t)^2} \qquad \textbf{(3.2)}$$

σ $Standardabweichung$

Für die meisten Anwendungen ist jedoch nicht die Standardabweichung als totaler, sondern als relativer Wert interessant. Daher wird der Variationskoeffizienten c eingeführt, welcher sich als maßstabsunabhängige Streuungsvariable präsentiert und sich damit vor allem in

[166] Hopp/Spearman, 2001, S. 255

Hinblick auf die Vergleichbarkeit unterschiedlichster Verteilungen eignet.[167] Formelmäßig errechnet sich dieser zu

$$c = \frac{\sigma}{t} \qquad (3.3)$$

c ... *Variabilitätskoeffizient*
σ ... *Standardabweichung*
t ... *Mittelwert*

Von diesem Variationskoeffizienten wird in den folgenden Kapiteln oftmals Gebrauch gemacht. Er ist das wichtigste Kriterium für die Charakteristik von Materialflüssen und soll daher an dieser Stelle vorab klassifiziert werden. Eine Verteilung mit c < 0,75 wird als wenig variabel eingestuft, eine Verteilung mit 0,75 < c < 1,33 wird als moderat variabel angesehen, und bei c > 1,33 spricht man von hoch variablen Verteilungen.[168]

3.4 Parameter eines Warteschlangensystems

An dieser Stelle sollen die wichtigsten Parameter für die Modellierung von Warteschlangen erläutert werden. Das folgende Bild zeigt das prinzipielle Verhalten des Materialflusses an einer Arbeitsstation.

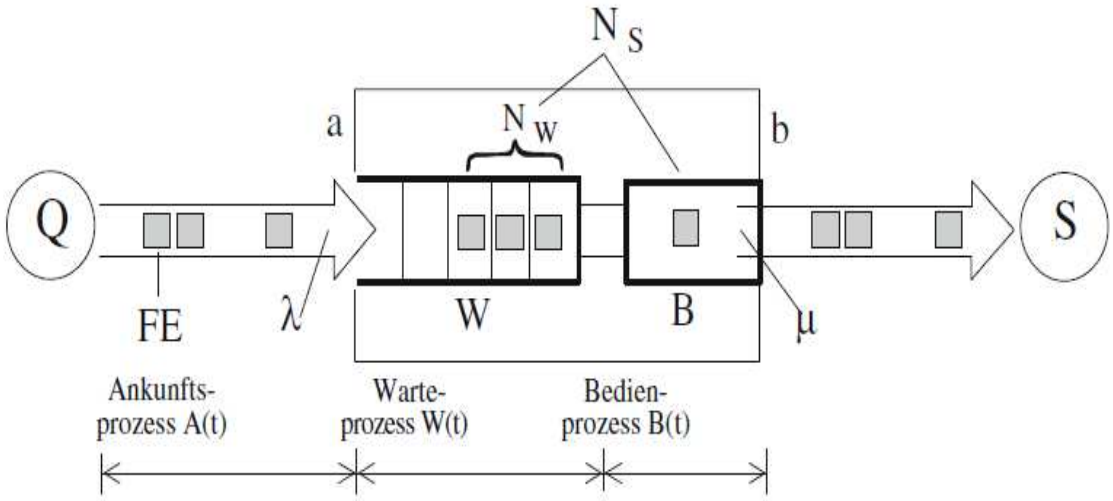


Abbildung 28: Elemente des Warteschlangensystems[169]

Betrachtet man den Warteraum und die Arbeitsstation als Black Box, so lässt sich eine noch einfachere Darstellung angeben:

[167] vgl. Keil, 2012, S. 160
[168] Hopp/Spearman, 2001, S. 252
[169] Quelle: Arnold/Furmans, 2009, S. 113

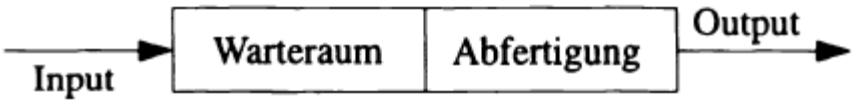


Abbildung 29: Prinzipdarstellung eines Wartesystems[170]

Die folgenden Abschnitte sollen die einzelnen Teilprozesse des Wartesystems näher beleuchten. Dabei ist anzumerken, dass anstatt der im deutschsprachigen Raum üblichen Notation λ (Ankunftsrate) und μ (Bedienrate) im weiteren Verlauf der Arbeit r_a für die Ankunftsrate und r_e für die effektive Prozessrate (= Bedienrate) verwendet wird.

Anmerkung: *In den folgenden Ausführungen beziehen sich alle Parameter auf die Bearbeitung einzelner Werkstücke. Der Übergang von der Betrachtung einzelner Einheiten zur Losfertigung erfolgt in Kapitel 4, demnach ist erst dort eine etwaige Ersetzung der Terminologie mit den aus Abschnitt 2.2 bekannten Größen ZAU, ZDF und ZUE zulässig.*

3.4.1 Ankunftsverhalten

Die Aufträge bzw. Werkstücke kommen von einer Quelle, welche an der vorhergehenden Arbeitsstation entsteht, sobald diese mit der Bearbeitung fertig ist. Danach werden die Aufträge (zumeist in Form von Transportlosen) zur nächsten Arbeitsstation transportiert, wo sie mit gewissen Abständen zueinander, der sogenannten Zwischenankunftszeit, eintreffen.[171] Eine Ausnahme bildet die erste Station einer Linie, deren Quelle außerhalb der betrachteten Systemgrenze liegt (z.B. Wareneingang).

Die Zwischenankunftszeit bzw. ihr Kehrwert, die Ankunftsrate r_a, bildet den ersten definierenden Parameter des Systemzustandes.

$$r_a = \frac{1}{t_a} \qquad (3.4)$$

r_a *Ankunftsrate (rate of arrival) [1/Std]*
t_a *mittleres Zeintintervall zwischen zwei aufeinanderfolgend ankommenden Aufträgen (Zwischenankunftszeit) [Std]*

Die Ankunftsrate ist also einfach die Anzahl der Aufträge, welche in einem bestimmten Zeitraum ankommen (hier eine Stunde). Der Ankunftsprozess unterliegt jedoch einer gewissen Variabilität, da die Ankunftsintervalle nur selten als deterministisch angesehen werden können (die Ausnahme sind genau getaktete Fließbandprozesse). Daher wird das Ankunftsverhalten durch Mittelwert und Standardabweichung beschrieben, was zu einem Variationskoeffizienten führt:

[170] Quelle: Domschke/Drexl, 2002, S. 193
[171] vgl. Dombacher, 1994, S. 2 ff.

$$c_a = \frac{\sigma_a}{t_a} \qquad (3.5)$$

c_a *Variationskoeffizient der Ankunftszeiten*

Abbildung 30 zeigt zwei verschiedene Ankunftsprozesse. Ein hoher Variationskoeffizient (high CV) führt hier zu sehr unregelmäßigen Ankünften, was natürlich die Beherrschbarkeit des Prozesses erschwert.[172] Sehr regelmäßige Ankünfte (also ein kleiner Variationskoeffizient, low CV) führen zu einem regelmäßigen Durchfluss (solange die Ankunftsrate kleiner als die Bedienrate bleibt).

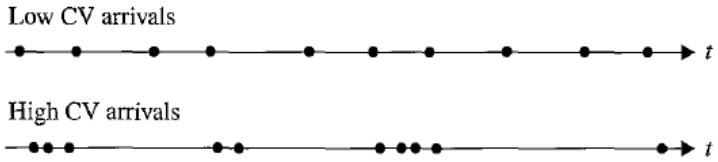


Abbildung 30: Ankunftsverhalten[173]

Der Effekt kann anhand eines einfachen Beispiels erläutert werden:[174] Es wird eine Arbeitsstation angenommen, an der über eine Schicht (hier 12 Stunden) verteilt 6 Werkstücke ankommen. In Szenario 1 kommen die Werkstücke in 2 Chargen zu je 3 Werkstücken an (um 10:00 und um 15:30 Uhr), in Szenario 2 kommt jede zweite Stunde ein einzelnes Werkstück an.

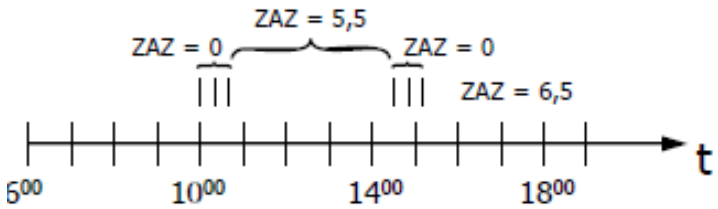


Abbildung 31: losweise Ankunft[175]

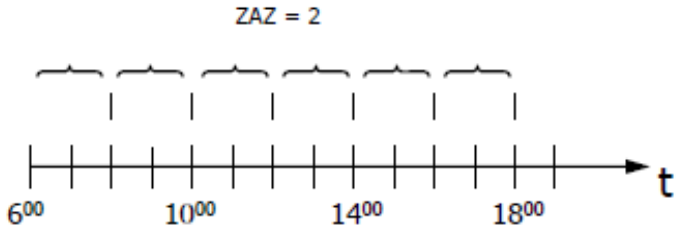


Abbildung 32: konstante Ankunftsintervalle

[172] Hopp/Spearman, 2001, S. 263
[173] Quelle: Hopp/Spearman, 2001, S. 262
[174] Engelhardt - Nowitzky, 2007, S. 16
[175] Quelle: Engelhardt - Nowitzky, 2007, S. 16

Die Ankunftsrate für beide Prozesse ist im Mittel gleich, nämlich 0,5 Werkstücke pro Stunde. Berechnet man jedoch die Variationskoeffizienten dieser beiden Ankunftsprozesse, so ergibt sich jener für Abbildung 31 mit den Gleichungen (3.2) und (3.5) zu c_a = 1,27, wohingegen der Prozess aus Abbildung 32 einen Variationskoeffizienten von 0 besitzt (was auch logisch erscheint, hier handelt es sich im Prinzip um einen getakteten Prozess). Der zweite Prozess ist daher weitaus leichter zu beherrschen, es tritt keine Stauung auf, daraus resultieren kürzere Durchlaufzeiten. Allerdings ist dabei der Kostenaspekt zu berücksichtigen, da immerhin 6 statt nur 2 Transportvorgänge nötig sind.[176] In diesem Beispiel (Szenario 1) kommen die Teile in Transportlosen zu festgelegten Zeitpunkten an. Zusätzlich können auch diese losweisen Zugänge in ihrem zeitlichen Abstand streuen, was zu zusätzlichen Unsicherheiten in der Planung und damit in der Regel zu noch höheren mittleren Durchlaufzeiten führt, da das durch ein längeres Ankunftsintervall überschüssige Kapazitätsangebot an der Arbeitsstation natürlich nicht konserviert und im Fall erhöhten Kapazitätsbedarfs (kürzeres Ankunftsintervall) leistungssteigernd eingesetzt werden kann.[177]

3.4.2 Abfertigungsverhalten

Die Bearbeitung (= Abfertigung) der Aufträge an der Arbeitsstation unterliegt weitaus mehr Einflüssen als der Ankunftsprozess. Die unterschiedlichen Faktoren sollen in den nächsten Abschnitten kurz erläutert werden (eine Auflistung fand sich bereits in Abschnitt 3.2).

3.4.2.1 "Natürliche" Variabilität

Die "natürliche" Prozesszeit kann als jene Zeit angesehen werden, welche am Arbeitsplatz gemessen werden kann. Sie beinhaltet nicht quantifizierbare, aber leistungsmindernde Effekte, wie z.B. die körperliche Verfasstheit des Bedieners oder verschiedener Materialeigenschaften der zu bearbeitenden Fertigungseinheit. Die natürliche Prozesszeit beinhaltet somit noch keine externen Einflüsse und findet sozusagen unter "perfekten" äußerlichen Betriebsbedingungen statt. Jedoch besteht bereits unter solchen Rahmenverhältnissen Variabilität, welche mit dem "natürlichen" Variationskoeffizienten c_0 berücksichtigt wird.[178]

$$c_0 = \frac{\sigma_0}{t_0} \; bzw. \; {c_0}^2 = \frac{{\sigma_0}^2}{{t_0}^2} \qquad \textbf{(3.6)}$$

c_0 *natürlicher Variationskoeffizient der Stichprobe (Messreihe)*
t_0 *Mittelwert der gemessenen Bearbeitungszeiten/Einheit [Std]*
σ_0 *Standardabweichung der Stichprobe (Messreihe) [Std]*
σ^2_0 *Varianz der Stichprobe (Messreihe)*

[176] Engelhardt - Nowitzky, 2007, S. 16
[177] Söhner, 1995, S. 35
[178] Hopp/Spearman, 2001, S. 255

In den meisten Produktionssystemen kann von wenig variablen natürlichen Prozesszeiten ausgegangen werden (c_0 < 0,75), jedoch muss die tatsächliche Verteilung inklusive aller leistungsmindernden Faktoren ermittelt werden, dienen diese Parameter doch als Ausgangspunkt für die Berechnung der "effektiven" Prozesszeit.[179]

3.4.2.2 Variabilität durch Ausfälle - Verfügbarkeit

Die unter perfekten Betriebsbedingungen aufgenommene Prozesszeit eines Arbeitsvorganges (natürliche Prozesszeit) ist in gewissem Sinne nur eine Momentaufnahme. Um die tatsächliche, durchschnittliche Prozesszeit zu bestimmen, müssen die in Abschnitt 3.2 erwähnten Einflüsse rechnerisch erfasst und miteinbezogen werden. Zum einen treten an einer Arbeitsstation unvorhersehbare, nicht kontrollierbare Ausfallszeiten auf (z.B. durch Verschleißerscheinungen).[180] Diese werden unter dem Begriff der Verfügbarkeit berücksichtigt. Dabei misst man die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Ausfällen (mean time to failures, MTTF) sowie die durchschnittliche Zeit, welche die Behebung dieses Fehlers in Anspruch nimmt (mean time to repair, MTTR). Die Verfügbarkeit der Station errechnet sich sodann zu

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \qquad (3.7)$$

A *Verfügbarkeit (availability) [%]*
$MTTF$ *mean time to failure [Std]*
$MTTR$ *mean time to repair [Std]*

Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit einer Arbeitsstation folgt für die effektive Prozesszeit t_e des betrachteten Prozesses:

$$t_e = \frac{t_0}{A} \qquad (3.8)$$

t_e *effektive Prozesszeit (Bearbeitungszeit)[Std]*

und für den effektiven Variationskoeffizienten

$$c_e{}^2 = c_0{}^2 + A * (1 - A) * \frac{MTTR}{t_0} + c_r * A * (1 - A) * \frac{MTTR}{t_0} \qquad (3.9)$$

c_e *Variationskoeffizient der Bearbeitungszeiten[-]*
c_r *Variationskoeffizient der Reperaturzeiten [-]*

Dabei bezeichnet c_r den Variationskoeffizienten der mit MTTR definierten Reparaturzeiten.

[179] vgl. Keil, 2012, S. 161 ff.
[180] Hopp/Spearman, 2001, S. 255 ff.

3.4.2.3 Variabilität durch vorhersehbaren Stillstand - Wartung

Wie der Titel schon besagt, handelt es sich hierbei um Ausfälle in der Produktionszeit, die bis zu einem gewissen Grad kontrolliert werden können. In diese Klasse fallen z.B. notwendige Wartungsarbeiten an der Maschine, Pausen, Meetings des Bedienungspersonals oder Schichtwechsel. Der wesentliche Unterschied zu den im vorigen Abschnitt behandelten unvorhersehbaren Ausfällen besteht darin, dass vorhersehbare Stillstände *zwischen* den Bearbeitungsvorgängen der Teile auftreten, nicht *währenddessen*.[181] Zur Berechnung dieser Stillstandzeiten benötigt man die Anzahl der Einheiten, welche zwischen zwei Wartungen bearbeitet werden, sowie die benötigte Zeit für eine Wartung. Um Verwirrung betreffend der Notation vorzubeugen, wird als Index für Wartung s (setup) verwendet. Es ergibt sich für den Mittelwert

$$t_e = t_0 + \frac{t_s}{n_s} \qquad \textbf{(3.10)}$$

mit t_e *Mittelwert der effektiven Prozesszeit [Std]*
t_s *Mittelwert der benötigten Zeit für eine Wartung [Std]*
n_s *Anzahl der zwischen zwei Wartungen bearbeiteten Einheiten [1]*

und für die Standardabweichung bzw. die Varianz:

$$\sigma_e{}^2 = \sigma_0{}^2 + \frac{\sigma_s^2}{n_s} + \frac{n_s - 1}{n_s{}^2} * t_s{}^2 \qquad \textbf{(3.11)}$$

$\sigma_e{}^2$ *Varianz des Bearbeitungsprozesses*

Für den Variationskoeffizienten folgt wieder:

$$c_e{}^2 = \frac{\sigma_e{}^2}{t_e{}^2} \qquad \textbf{(3.12)}$$

c_e *Variationskoeffizient des Bearbeitungsprozesses*

3.4.2.4 Variabilität durch Nacharbeit

Ein weiterer Grund für Variabilität in Prozesszeiten sind Qualitätsprobleme. Wenn ein Auftrag den Fertigungsprozess an einer Station durchlaufen hat, wird überprüft, ob der Output den Vorstellungen entspricht. Ist dies nicht der Fall, wird entweder aussortiert (Ausschuss) oder der Vorgang wiederholt (Nacharbeit). Es ist ersichtlich, dass Nacharbeit einen ähnlichen Effekt auf die Variabilität der Prozesszeit hat wie die in Abschnitt 3.4.2.3 erläuterten wartungsbedingten Stillstände (sofern sich der Nacharbeitsanteil abschätzen

[181] Hopp/Spearman, 2001, S. 258

lässt).[182] Daher soll an dieser Stelle auf dieses Phänomen nicht näher eingegangen werden, es sollte jedoch bei der Untersuchung eines realen Produktionssystemes nicht gänzlich vernachlässigt werden.

3.4.2.5 Ermittlung der effektiven Prozesszeit

Für die nachfolgenden Ausführungen ist die Kenntnis über die wesentlichen Prozessdaten, also Mittelwert und Variationskoeffizient der effektiven Prozesszeit, erforderlich. Diese können mittels der in den letzten Abschnitten erläuterten Gleichungen ermittelt werden. Dafür "beobachtet" man zuerst die natürliche Prozesszeit, und beschreibt deren Verteilung mittels t_0 und c_0. Danach ermittelt man die Verfügbarkeit der Arbeitsstation gemäß Abschnitt 3.4.2.2 und ermittelt damit die Verteilungsparameter der effektiven Prozesszeit t_e. Die so ermittelten Größen t_e und c_e setzt man sodann anstatt t_0 und c_0 in die Gleichungen (3.1) bis (3.6) ein. Die daraus berechneten Größen t_e und c_e beschreiben schließlich die den weiteren Berechnungen zugrundeliegenden mittlere effektive Prozesszeit bzw. deren Streuung (Variationskoeffizient).[183] Ist eine analytische Berechnung der Streuung nicht möglich, schätzt man oftmals den Variationskoeffizienten c_e. Dabei greift man in der Regel auf Erfahrungswerte zurück. Bei Handarbeitsplätzen besitzen - empirischen Studien zufolge - selbst bei Fließbandarbeit die Bearbeitungszeiten zumeist einen Variationskoeffizienten zwischen 0,1 und 0,6.[184]

3.4.3 Beziehung Abfertigungsrate - Ankunftsrate - Auslastung

Der Bearbeitungsprozess besitzt also die in den vorhergehenden Abschnitten erläuterte effektive Prozesszeit t_e, und damit die effektive Prozessrate r_e

$$r_e = \frac{1}{t_e} \qquad \textbf{(3.13)}$$

mit r_e *effektive Prozessrate (auch Bedienrate genannt)[1/Std]*
t_e *effektive Prozessdauer (Bearbeitungszeit je Auftrag)[Std]*

Damit die Arbeitsstation mit den Ankunftsraten Schritt halten kann und nicht mit Arbeit überfüllt wird, muss die Kapazität der Arbeitsstation immer größer als die Ankunftsrate sein, also muss gelten:

$$r_e > r_a \qquad \textbf{(3.14)}$$

Jede Arbeitsstation kann nur eine bestimmte Anzahl von Aufträgen (bzw. Einheiten) in

[182] Hopp/Spearman, 2001, S. 260
[183] Hopp/Spearman, 2001, S. 261
[184] Günther/Tempelmeier, 2014

einem bestimmten Zeitintervall abarbeiten. Dieser Umstand wird durch die Kapazität bezeichnet (vergleiche dazu die Begriffe TKAP und L_{max} in Abschnitt 2.2.3). Die Kapazität einer Maschine wird jedoch nur in den seltensten Fällen voll ausgenützt, daher ist als Kennzahl der Auslastungsgrad der Station entscheidend. Dieser Auslastungsgrad wird in der Warteschlangentheorie durch das Verhältnis von Ankunfts- und Bedienrate gebildet[185], also

$$u = \frac{r_a}{r_e * m} = \frac{r_a * t_e}{m} = \frac{t_e}{t_a * m} \qquad \textbf{(3.15)}$$

u *Auslastungsgrad (utilization) [-]*
m *Anzahl paralleler Maschinen an der Arbeitsstation[1]*

Um einen stationären Betriebszustand zu erreichen (nur in diesem Fall erhält man über das Modell vernünftige Aussagen), muss u < 1 gelten.[186] Nach der Warteschlangentheorie ist also keine Aussage bei Vollauslastung, also u = 1, mehr möglich. Dies deckt sich auch mit der Kritik aus Abschnitt 2.4.5.

3.4.4 Abgangsverhalten

Nach der Bearbeitung verlässt die betrachtete Einheit mit der Abgangsrate r_d das System und wird an die Senke weitertransportiert, welche gleichzeitig als Quelle des nachfolgenden Bearbeitungsprozesses dient. Der Mittelwert der Abgangszwischenzeiten entspricht dabei (sofern keine Verluste innerhalb der Station auftreten, was angenommen werden soll) immer der mittleren Zwischenankunftszeit an dieser Station (Erhaltung des Materialflusses).[187] Die Abgangsrate wird auch als Durchsatz bezeichnet (im Englischen throughput).[188]

$$r_d = \frac{1}{t_d} = \frac{1}{t_a} \qquad \textbf{(3.16)}$$

mit r_d *Abgangsrate (rate of departure)[1/Std]*
t_d *mittleres Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden abgehenden Einheiten[Std]*

Die Form des Abgangsprozess lässt sich basierend auf den zuvor definierten Größen (Ankunftsrate, effektive Prozessrate und Auslastung) berechnen.[189] So ergibt sich durch Überlegung für eine voll ausgelastete Station (u = 1) ein Abgangsprozess, welcher dem Bearbeitungsprozess entspricht. Daraus resultiert auch ein Abgangsvariationskoeffizient

[185] Hopp/Spearman, 2001, S. 218
[186] z.B. Missbauer, 1998, S. 319
[187] Hopp/Spearman, 2001, S. 262
[188] vgl. Dombacher, 1994, S. 11
[189] Hopp/Spearman, 2001, S. 263

$c_d = c_e$. Im anderen Extremfall (u = 0) wird der Abgangsprozess ausschließlich durch den Ankunftsprozess bestimmt, also gilt in diesem Fall $c_d = c_a$. Nun kann, um das Abgangsverhalten für den Fall von 0 < u < 1 zu bestimmen, zwischen den beiden Extremzuständen interpoliert werden. [190] Es ergibt sich:

$$c_d^2 = 1 + (1 - u^2) * (c_a^2 - 1) + \frac{u^2}{\sqrt{m}} * (c_e^2 - 1) \quad \textbf{(3.17)}$$

c_d *Variationskoeffizient des Abgangprozesses [-]*
u *Auslastung [-]*
m *Anzahl der Maschinen in der Arbeitsstation [1]*

Für die nachfolgende Arbeitsstation (i + 1) entsprechen nun die Werte für Mittelwert und Variationskoeffizient des Ankunftsprozesses jenen von Mittelwert und Variationskoeffizient des Abgangsprozesses der Station i.

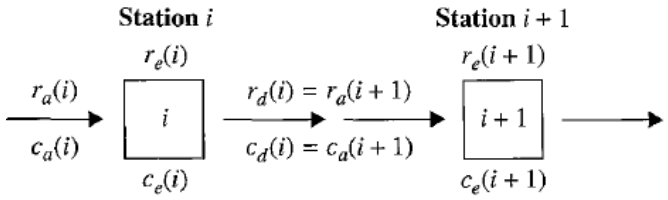


Abbildung 33: Übergangsverhalten Produktionslinie[191]

3.5 Berechnung der Leistungskennzahlen

Mit den im vorigen Kapitel erhaltenen Größen lassen sich nun die für die Fragestellung relevanten Kennzahlen berechnen. Setzt man die Wartezeit mit der Übergangszeit gleich (was die Vernachlässigung von Transport- und anderen Zeiten voraussetzt, jedoch in vielen Fällen eine gute Näherung darstellt) sowie die effektive Prozesszeit mit der Durchführungszeit (akkurat für Losgröße 1) , so erhält man die Beziehung[192]

$$ZW = ZDL - t_e \quad \textbf{(3.18)}$$

ZW *Wartezeit [Std]*
ZDL *Durchlaufzeit [Std]*
t_e *effektive Prozesszeit [Std]*

Die Anzahl der im System verweilenden Einheiten (work in progress) erhält man über Little´s Gesetz, welches in Abschnitt 2.3.5 bereits erläutert wurde:

[190] Hopp/Spearman, 2001, S. 263
[191] Quelle: Hopp/Spearman, 2001, S. 262
[192] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S. 86

$$N_S = r_a * ZDL \quad \textbf{(3.19)}$$

N_S *Anzahl der Aufträge im Arbeitssystem (an der Arbeitsstation) [1]*

Die Anzahl der wartenden Einheiten ergibt sich, wenn man Little´s Gesetz auf die Warteschlange vor der Arbeitsstation anwendet:

$$N_W = r_a * ZW \quad \textbf{(3.20)}$$

N_W *Anzahl der Aufträge in der Warteschlange [1]*

Zusammen mit den im vorigen Kapitel erläuterten Zusammenhängen reicht nun die Kenntnis einer dieser vier Größen (ZW, ZDL, N_S oder N_W) aus, um die anderen drei berechnen zu können und somit das System zu modellieren.[193]

3.6 Notation der Warteschlangenmodelle

Um der Realität an den Arbeitsstationen möglichst nahe zu kommen, wurden verschiedene Verteilungsformen für die Ankunfts- und Bedienrate untersucht, sowie zwischen Ein- und Mehrmaschinenfällen (parallel arbeitend) unterschieden. Heute wird ein einheitliches, internationales Kennzeichnungssystem - die Kendallsche Notation - eingesetzt, welches über eine Reihe von Buchstaben und Zahlen das angewandte Modell klassifizieren soll: [194]

A / B / s / mw / WSD

- Der erste Buchstabe (A) bezeichnet die Form der Verteilung der Ankunftszeiten (Ankunftsprozessverhalten)
- Der zweite Buchstabe (B) bezeichnet die Form der Verteilung der Bedienzeiten (Abfertigungsprozessverhalten)
- Die dritte Kennzahl gibt Auskunft darüber, wie viele Maschinen parallel den Auftrag bedienen (s)
- Der dritte bzw. vierte Wert kennzeichnet die Anzahl der Plätze im Wartesystem (mw) bzw. die Bedienstrategie bzw. die Reihenfolgebildung (WSD).

Jedoch trifft man bei der Modellierung von Produktionsvorgängen zumeist die folgenden zwei Annahmen:

[193] Hopp/Spearman, 2001, S. 266
[194] vgl. Nyhuis/Wiendahl, 2012

- Es gilt das FIFO- Prinzip (First In - First Out) bei Einplatzsystemen bzw. das FCFS- Prinzip (First Come - First Serve), das bedeutet, es werden keine Priorisierung eines Werkstückes bzw. eines Loses vorgenommen.
- Es wird eine unbegrenzte Anzahl an Warteplätzen angenommen.

Dadurch beschränkt sich die Notation, welche im Folgenden verwendet werden soll, auf die ersten drei Werte. Man geht von drei verschiedenen möglichen Verteilungen von Ankunfts- und Abfertigungsprozessen aus:

- Taktprozesse (Diracverteilungen, konstante Zwischenankunftzeiten bzw. Abfertigungsintervalle, im folgenden mit D abgekürzt)
- Poissonverteilte Prozesse (Markov- Verteilung, im Folgenden M)
- Generell verteilte Prozesse (können nur über Mittelwert und Standardabweichung beschrieben werden, die genaue Verteilungsform ist hier nicht bekannt, im Folgenden G)

Die Art der Verteilung und die Anzahl der parallelen Maschinen, welche an einem Auftrag arbeiten, bestimmen das Modell, welches verwendet werden soll. In den nächsten Kapiteln sollen die wichtigsten Modelle kurz erläutert werden.

3.7 Überblick über die wichtigsten Modelle

In den folgenden Abschnitten sollen nun die wichtigsten Warteschlangenmodelle beschrieben werden. Dabei werden zunächst sehr einfache Konstellationen erläutert, welche sich analytisch exakt beschreiben lassen. Die Beschreibung allgemeiner Prozesse erfordert Näherungsgleichungen, welche sodann im praktischen Teil Anwendung finden werden.

3.7.1 Das D/D/1 Modell

Ein reiner Fließprozess ist sehr einfach zu beschreiben. Sowohl Ankunfts- wie auch Bedienraten sind deterministisch verteilt, das bedeutet, die Intervalle zwischen ankommenden wie auch abgehenden Einheiten sind fest und bestimmt (determiniert).[195] In einem solchen Fall, der eigentlich nur in reiner Fließbandproduktion vorkommt, wird Wartezeit vor einer Arbeitsstation nur dann auftreten, wenn die Ankunftsrate höher ist als die Abfertigungsrate, also wenn gilt:

$$r_a > r_e \qquad \textbf{(3.21)}$$

r_a $Ankunftsrate\ [1/Std]$
r_e $Bearbeitungs\text{-}\ (Abfertigungs\text{-})\ rate\ [1/Std]$

[195] vgl. Dombacher, 1994, S. 13 ff.

Daraus folgt eine Auslastung des Systems u > 1, was jedoch zu einer Warteschlange vor der Arbeitsstation führt, welche ad infinitum zunimmt, d.h. der Prozess ist instationär.[196] Solange dieser Fall nicht eintritt (also u < 1 gilt), wird sich niemals eine Warteschlange bilden, da das System jedes Mal, wenn eine neue Einheit eintritt, leer ist. Da es sich beim D|D|1 Modell um deterministische Vorgänge handelt und weder Zu- noch Abgang über Variabilität bzw. eine stochastische Verteilungsform verfügt, darf es strenggenommen nicht zu den Warteschlangensystemen gezählt werden.[197]

3.7.2 Das M/M/1 - Modell

Das M/M/1 Modell ist das wohl einfachste Modell mit stochastischem Ankunfts- und Bedienprozess, welches zwar zumeist nicht direkt auf tatsächliche Produktionsvorgänge anwendbar ist, aber einen Ausgangspunkt für weitere Überlegungen bildet und sehr schnell einen Einblick in die prinzipiellen Zusammenhänge der Warteschlangentheorie bietet. Daher wird es in der Literatur recht häufig für Anschaulichkeitszwecke verwendet.[198] Beim M/M/1 Modell folgt der Ankunftsprozess wie auch der Abfertigungs- bzw. Bedienprozess einer Poissonverteilung. Dies impliziert, dass die mittleren Zwischenankunftszeiten und die Bedienzeiten exponentialverteilt sind, was einem Variationskoeffizienten von 1 entspricht.[199] Somit benötigt man zur Beschreibung der Ankunftsintervalle bzw. der Abfertigungsintervalle nur deren Mittelwert, da sich mit $c_a = c_e = 1$ die Standardabweichung gleich dem Mittelwert ergibt.[200] Eine wichtige Eigenschaft von Poissonverteilungen ist die sogenannte "Markoveigenschaft", welche auch als "fehlendes Erinnerungsvermögen" bezeichnet werden kann.[201] Dies bedeutet, dass die Verteilung zu jedem Zeitpunkt unabhängig vom vorhergehenden Zustand ist. Diese Eigenschaft ist vor allem bei der Betrachtung von Netzwerken sehr nützlich.

Es folgt mit den Beziehungen (3.15) und (3.19) für die mittlere Anzahl von Aufträgen im Arbeitssystem[202]:

$$N_S(M/M/1) = \frac{u}{1-u} \qquad \textbf{(3.22)}$$

N_S *Anzahl der Aufträge im System (Auftragsbestand) [-]*
u *Auslastung [-]*

[196] Söhner, 1995, S. 72
[197] Zimmermann, 2001, S.362
[198] vgl. Dombacher, 1994, S. 17
[199] Hopp/Spearman, 2001, S. 267 ff.
[200] Hopp/Spearman, 2001, S.267
[201] Roßberg, 2012, S. 57
[202] Herleitung siehe Hopp/Spearman, 2001, S.267 ff.

Für die Durchlaufzeit ergibt sich mithilfe der Beziehung (3.19):

$$ZDL(M/M/1) = \frac{N_S}{r_a} = \frac{u * t_a}{1-u} = \frac{t_e}{1-u} \quad \textbf{(3.23)}$$

ZDL $Durchlaufzeit\ [Std]$
t_a $Ankunftsintervall\ (Zwischenankunftszeit)\ [Std]$
t_e $effektive\ Bearbeitungszeit\ [Std]$

Für die Wartezeit ZW ergibt sich aus der Gleichung (3.18)

$$ZW = ZDL - t_e = \frac{u}{1-u} * t_e \quad \textbf{(3.24)}$$

ZW $Wartezeit\ [Std]$

und für die Anzahl der Aufträge in der Warteschlange N_W mit (3.20)

$$N_W(M/M/1) = r_a * ZW = \frac{u^2}{1-u} \quad \textbf{(3.25)}$$

N_W $Anzahl\ Aufträge\ im\ Warteraum\ [-]$

3.7.3 Das G/G/1 - Modell

In einer realen Produktionsumgebung erfüllen die Arbeitssysteme zumeist nicht die Bedingungen des M/M/1 Modells. Deshalb muss hier ein Modell mit generelleren Ankunfts- und Prozesszeitenverteilungen benutzt werden. Ein solches ist das G/G/1 Modell, welches im Ankunfts- sowie Bedienprozess eine generelle Verteilung zulässt. Leider lassen sich ohne der erinnerungslosen Eigenschaft der Exponentialverteilung - wie bereits erwähnt - keine exakten Werte für die gesuchten Kennzahlen berechnen. Jedoch lassen sich diese durch eine Approximation zweiter Ordnung annähern. Dafür benötigt man die Mittelwerte sowie die Standardabweichung, bzw. die Varianzkoeffizienten der Ankunfts- und Prozessraten c_a und c_e.[203]

$$ZW(G/G/1) = (\frac{{c_a}^2 + {c_e}^2}{2}) * (\frac{u}{1-u}) * t_e \quad \textbf{(3.26)}$$

Diese Näherungsgleichung wurde zuerst von Kingman (1961) untersucht.[204] Anzumerken ist, dass sich diese Gleichung für den Fall exponentialverteilter Ankunfts- und Abgangsprozesse,

[203] Hopp/Spearman, 2001, S. 270
[204] eine Herleitung findet sich in Bhat, 2008, S. 169 ff.

also $c_a = c_e = 1$, zu der Warteschlangenformel für ein M|M|1 - Modell reduziert. Deshalb soll in den Simulationsmodellen in Kapitel 5 *immer* von dieser Formel ausgegangen werden, da sie die anderen Ein- Server- Fälle durch Definition der Variationskoeffizienten enthält. Die Gleichung (3.26) lässt sich in drei Teile aufspalten, einen Variations-, einen Auslastungs- und einen Zeitterm. Hopp und Spearman nennen diese Gleichung daher auch "*VUT Gleichung*". Darin sind:[205]

- $V = 1/2*(c_a^2+c_e^2)$ Variabilitätsterm
- $U = u/(1-u)$ Auslastungsterm
- $T = t_e$ Zeitterm

Mit dieser Aufspaltung lassen sich die Abhängigkeiten innerhalb einer Warteschlange gut erklären. So erkennt man, dass die Wartezeit (und damit auch die Durchlaufzeit) sehr stark von der Streuung des Ankunfts- und des Bedienprozesses abhängt (die Variationskoeffizienten gehen in quadrierter Form ein). Einen noch stärkeren Einfluss auf die Wartezeit hat die Auslastung. Man erkennt, dass bei einer Auslastung nahe 1 der Auslastungsterm U sehr groß wird (1 - u im Nenner strebt dann gegen 0). [206] Das bedeutet, dass die Durchlaufzeit im Wesentlichen von den Variabilitäten der Ankunfts- und Bedienzeiten, dem Mittelwert der Bedienzeiten sowie - noch weitaus stärker - von der Auslastung der Arbeitsstation abhängt.

Die Werte für die Durchlaufzeit sowie den Auftragsbestand an der Station lassen sich durch Einsetzen von ZW in die Gleichungen (3.18)und (3.19) ermitteln.

3.7.4 Das M/M/m - Modell

Arbeitsstationen bestehen zuweilen aus mehreren parallel arbeitenden Maschinen, welche dieselbe Arbeit ausführen. Der Grund dafür besteht einfach in der Kapazitätsanforderung an die Arbeitsstation. Kann diese von einer einzelnen Maschine nicht erfüllt werden, so muss der Arbeitsvorgang auf mehrere gleichartige Maschinen aufgeteilt werden. In einem solchen Fall bildet sich vor der Arbeitsstation mit m Maschinen *eine* gemeinsame Warteschlange, deren Länge von Sakasegawa 1977 folgendermaßen angenähert wurde[207]:

$$ZW(M|M|m) = \frac{u^{\sqrt{2*(m+1)}-1}}{m*(1-u)} * t_e \qquad \textbf{(3.27)}$$

m *Anzahl der Maschinen in der Arbeitsstation [-]*

Es ist ersichtlich, dass sich dieser Ausdruck mit m = 1 zur Gleichung (3.24) reduziert.

[205] Hopp/Spearman, 2001, S. 270
[206] Hopp/Spearman, 2001, S. 304
[207] Hopp/Spearman, 2001, S. 272

3.7.5 Das G/G/m - Modell

Das Warteverhalten an einer Arbeitsstation mit generell verteilten Ankunfts- und Prozesszeiten und mehreren parallel arbeitenden Maschinen kann über Analogien zu vorhin erläuterten Modellen angenähert werden. Man erkennt, dass das G|G|1 - Modell aus Abschnitt 3.7.3 auch folgendermaßen geschrieben werden kann:

$$ZW(G/G/1) = (\frac{{c_a}^2 + {c_e}^2}{2}) * ZW(M|M|1) \quad \textbf{(3.28)}$$

Dieser Umstand legt die Annahme nahe, dass ein ähnlicher Zusammenhang zwischen dem M|M|m Modell und dem G|G|m Modell besteht.[208] Damit lässt sich letzteres folgendermaßen anschreiben:

$$ZW(G/G/m) = (\frac{{c_a}^2 + {c_e}^2}{2}) * ZW(M|M|m) \quad \textbf{(3.29)}$$

Damit folgt für die Warteschlange eines G|G|m Systems:

$$ZW(G|G|m) = (\frac{{c_a}^2 + {c_e}^2}{2}) * \frac{u^{\sqrt{2*(m+1)}-1}}{m*(1-u)} * t_e \quad \textbf{(3.30)}$$

Analog zu Abschnitt 3.7.3 soll für Arbeitsstationen mit mehreren parallelen Maschinen im Folgenden *immer* diese Gleichung verwendet werden.

3.8 Warteschlangennetzwerke

Eine Produktionslinie besteht zumeist aus mehreren Arbeitsstationen, welche in einem bestimmten Ablauf (Route) von den Aufträgen durchlaufen werden. Dabei muss im Allgemeinen nicht jeder Auftrag jede Maschine passieren, deshalb muss der Ankunfts- und Abfertigungsprozess eines jeden Auftrags an jeder Arbeitsstation betrachtet werden. Diese Vorgehensweise wird in der Literatur auch als Dekompositionsverfahren bezeichnet.[209] Dabei modelliert man die einzelnen Stationen als Netzknoten, welche sich zu einem Netzwerk verbinden.[210] Nach der Berechnung der einzelnen Kennzahlen (also z.B. der Durchlaufzeiten) können die Daten wieder aggregiert werden, wodurch sich die

[208] siehe dazu Whitt, 1983
[209] Häfner, 1992, S. 103 ff.
[210] Söhner, 1995, S. 78

Auftragsdurchlaufzeiten der einzelnen Aufträge durch einfache Addition der Einzeldurchlaufzeiten ergeben (vergleiche dazu Abschnitt 2.2.8).

Warteschlangennetzwerke werden nach ihrer Interaktion mit der Umwelt unterteilt in

- Offene Warteschlangennetze: Aufträge können von außerhalb des Netzes kommen und dieses wieder verlassen
- Geschlossene Warteschlangennetze: Die Anzahl der Aufträge in geschlossenen Netzen bleibt konstant

Außerdem wird unterschieden zwischen homogenen Netzwerken (nur eine Art von Aufträgen durchläuft auf einer festen Route die Stationen) und Netzen mit verschiedenen Auftragsklassen. Bei Zweiteren unterscheiden sich die Auftragsklassen durch unterschiedliche Bedienungszeiten und unterschiedliche Beanspruchung der einzelnen Arbeitsstationen/-knoten (unterschiedliche Übergangsraten). [211]

Die Verbindungen der vorhin erwähnten Netzknoten lassen sich in divergierende, konvergierende und lineare Strukturen unterteilen. [212] Abbildung 34 bietet hierzu einen Überblick:

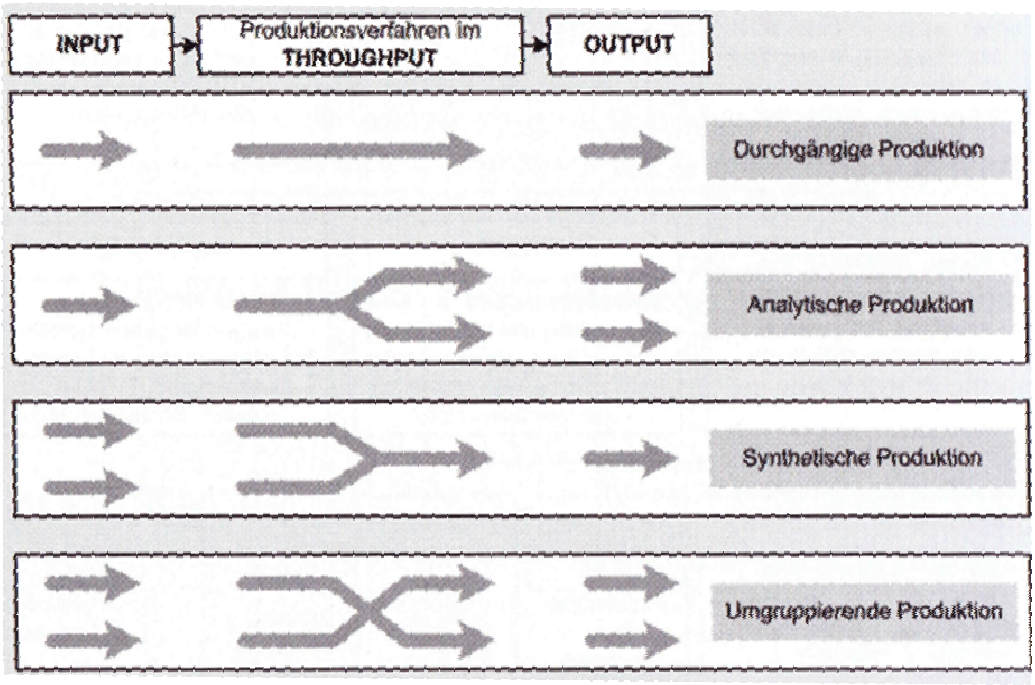


Abbildung 34: verschiedene Produktionsstrukturen[213]

[211] Roßberg, 2012, S. 128
[212] z.B. Nebl, 2007, S. 50
[213] Quelle: Nebl, 2007, S. 50

In dieser Arbeit sollen nur durchgängige Produktionsstrukturen näher betrachtet werden, da die Betrachtung anderer Strukturen den Rahmen sprengen würde. Jedoch würden sich durch die analytische Betrachtung der einzelnen Stationen auch alle anderen Produktionsstrukturen auf ähnliche Weise untersuchen lassen.

3.8.1 Serienschaltung von Arbeitsstationen - durchgängige Produktionslinie

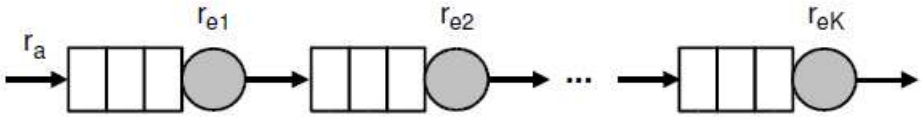


Abbildung 35 Serienschaltung von Arbeitsstationen[214]

Im Falle von K hintereinander angeordneten Stationen, welche alle vom betrachteten Auftrag durchlaufen werden, ergibt sich die Durchlaufzeit gemäß Abschnitt 2.2.8 zu:

$$ZDA = \sum_{i=1}^{K} ZDL_i \qquad \textbf{(3.31)}$$

K *Anzahl der nacheinander durchlaufenen Arbeitsstationen [-]*
ZDA *Auftragsdurchlaufzeit [Std]*
ZDL_i *Durchlaufzeit an Arbeitsstation i*

Da im praktischen Teil immer G|G|1 Modelle verwendet werden sollen (aufgrund der Einstellungsmöglichkeiten der Variationskoeffizienten), ist zu beachten, dass - abgesehen von der Ankunftsverteilung an der ersten Station - sich die Ankunftsverteilungen der Stationen (Variationskoeffizient) aus den Abgangsverteilungen der Vorgängerstationen ergeben (vergleiche Abschnitt 3.4.4). Nur für den Fall einer Hintereinanderschaltung von M|M|1 Modellen bleibt der Variationskoeffizient über die Linie hinweg konstant (erinnerungslose Eigenschaft). Solche Warteschlangennetze werden auch Jackson-Netze genannt. Allerdings sollen solche Netze an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden, da in einer realen Umgebung die Annahme von lauter poissonverteilten Ankunfts- und Bedienprozessen (welche als Voraussetzung für die Anwendung von Jackson-Netzen gilt) zu sehr großen Fehlern in der Zielfunktion, also der Auftragsdurchlaufzeit, führen kann (oftmals mehrere 100 Prozent).[215] Damit ist klar, dass zur Modellierung "*nur allgemeine Netze in Frage kommen, welche zur mathematischen Beschreibung keine bestimmten Verteilungen der stochastischen Prozesse voraussetzen. Dies impliziert, dass damit aber auch Jackson-Netze modelliert werden können.*"[216] Da allgemeine Verteilungen nur approximativ

[214] Quelle: Puffer, 2007, S. 104
[215] Söhner, 1995, S.111
[216] Söhner, 1995, S. 112

modelliert werden können, treten auch hier gewisse Fehler auf, welche jedoch zumeist relativ gering sind.

3.8.2 Mehrfach durchlaufene Stationen

Wird eine Arbeitsstation von einem Auftrag oder aber auch von mehreren Aufträgen mehrfach durchlaufen, so werden die Ankunftsraten der einzelnen Auftragsströme an dieser Station einfach addiert.

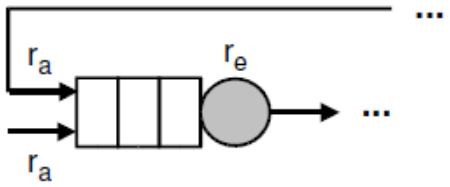


Abbildung 36: mehrfach durchlaufene Arbeitsstation[217]

$$r_a{}' = V * r_a \qquad \textbf{(3.32)}$$

$r_a{}'$ $Ankunftsrate$
V $Anzahl\ der\ Ankunftsströme$
r_a $Ankunftsrate\ eines\ einzelnen\ Ankunftsstroms$

Die Auslastung einer solchen Station muss entsprechend berechnet werden, die resultierende Ankunftsrate wird dazu anstatt der individuellen Rate herangezogen.

3.8.3 Position der Station im Netzwerk

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Betrachtung eines Netzwerkes liegt in der sinnvollen Anordnung der einzelnen Arbeitssysteme. So wirkt sich eine Station, an welcher sehr variable Prozesszeiten festgestellt werden, unterschiedlich auf den Materialfluss und die Durchlaufzeit aus, je nachdem, an welcher Position der Route sie sich befindet. Dies wird auch als "Ausstrahlungseffekt" bezeichnet.[218] Die Variabilität des Abgangsstroms setzt sich gemäß Abschnitt 3.4.4 aus der Variabilität des Ankunfts- sowie Bearbeitungsprozesses zusammen und wird damit an die nachfolgenden Stationen weitergegeben. Hochvariable Bearbeitungszeiten führen also zu sehr unregelmäßigen Ankünften an der nachfolgenden Maschine, was wiederum zu höheren Auftragsdurchlaufzeiten führt. Daher sollten Stationen mit hochvariablen Bearbeitungszeiten so weit "downstream" wie möglich angeordnet

[217] Quelle: Puffer, 2007, S. 106
[218] Häfner, 1992, S. 146 ff.

werden, da sie so weniger Einfluss auf den Materialfluss der anderen Maschinen ausüben können.[219]

Außerdem hat die Variabilität der Bearbeitungszeiten der betrachteten Station einen umso höheren Effekt auf die Variabilität des Ankunftsstroms an der nachfolgenden Station, je höher die Auslastung der betrachteten Station ist. Dies deckt sich mit den Aussagen aus Abschnitt 2.3.1, wonach eine Engpassmaschine mit hoher Auslastung möglichst zu Beginn der Route ("upstream") angeordnet sein sollte und einen geringen Variationskoeffizienten der Bearbeitungszeiten aufweisen soll. Dadurch wird die Variabilität des Abgangsprozesses und damit des Ankunftsprozesses an der Nachfolgestation stark reduziert. Dies resultiert in niedrigeren Beständen an der gesamten Linie sowie kürzeren und varianzärmeren Auftragsdurchlaufzeiten.[220] Eine nähere Behandlung dieses Effektes soll hier nicht vorgenommen werden, allerdings können durch ein geschicktes Routing der Aufträge (sofern dies technologisch möglich ist) teils erhebliche Durchlaufzeitvorteile erzielt werden. [221]

3.9 Zusammenfassung der Theorie aus Kapitel 3

Wie in Abschnitt 2.2.7 bereits erläutert, setzt sich die Durchlaufzeit eines Werkstücks durch eine Arbeitsstation aus Übergangs- und Durchführungszeit zusammen. Die Übergangszeit besteht dabei - unter Vernachlässigung der Transportzeit - zum überwiegenden Großteil aus Wartezeit vor der Station. Also kann man die Durchlaufzeit vereinfachend auch folgendermaßen schreiben:

$$ZDL = ZW + \mathrm{t_e} \qquad \textbf{(3.33)}$$

ZDL $Durchlaufzeit\ [Std]$
ZW $Wartezeit\ [Std]$
te $Prozesszeit\ (Bearbeitungszeit)\ [Std]$

Abhängig davon, welche Verteilungen Ankunfts- und Bedienrate besitzen und aus wie vielen parallelen Maschinen die Arbeitsstation besteht , erhält man damit eine Aussage über die Zeit, die eine Einheit benötigt, um diese Arbeitsstation vollständig zu durchlaufen. Werden mehrere Stationen zu einem Netzwerk zusammengeschlossen, so ergibt sich die Durchlaufzeit entlang einer bestimmten Route durch Addition der Stationsdurchlaufzeiten an den einzelnen Stationen.

In Kapitel 3 wurde festgestellt, dass die Auftragsdurchlaufzeit im Wesentlichen von folgenden Einflüssen abhängt:

[219] Puffer, 2007, S. 120
[220] Riezebos, 2001, S.81
[221] Goldratt, 1981

- der Variabilität des externen Ankunftsprozesses (Ankunft an erster Station)
- der Variabilität der Bedienprozesse
- den mittleren Bedienungszeiten
- der Auslastung der Arbeitsstationen
- der Position der Arbeitsstation im Materialfluss
- der Anzahl an Stationen in der Produktionslinie

Bei der Planung müssen also all diese Einflüsse berücksichtigt werden, um ein gutes Ergebnis zu erzielen. Im nächsten Kapitel soll die Betrachtung nun auf den Regelfall einer losweisen Bearbeitung ausgeweitet werden, die grundlegenden Überlegungen aus diesem Kapitel behalten aber auch dort weiterhin Gültigkeit.

4 Loseffekte

Die Einflüsse der Losgrößenwahl auf die Leistung wie auch die Kosten der Produktfertigung werden oftmals unterschätzt. Losgrößen üben sehr starken Einfluss auf mehrere zentrale Kriterien der Produktionsplanung aus. Deshalb besteht laut Söhner "*in der Literatur Dissens darüber, welches Kriterium bei der Planung der Losgrößen beachtet werden soll. Während neuere Ansätze die Minimierung der mittleren Durchlaufzeit anstreben, verfolgen klassische Losgrößenverfahren die Minimierung der Rüst- und Lagerkosten. Darüber hinaus existieren weitere bedeutende Kriterien, die von den Losgrößen beeinflusst werden.*"[222] Abbildung 37 zeigt, auf welche Bereiche des Unternehmens die Wahl der Losgröße entscheidenden Einfluss ausübt.

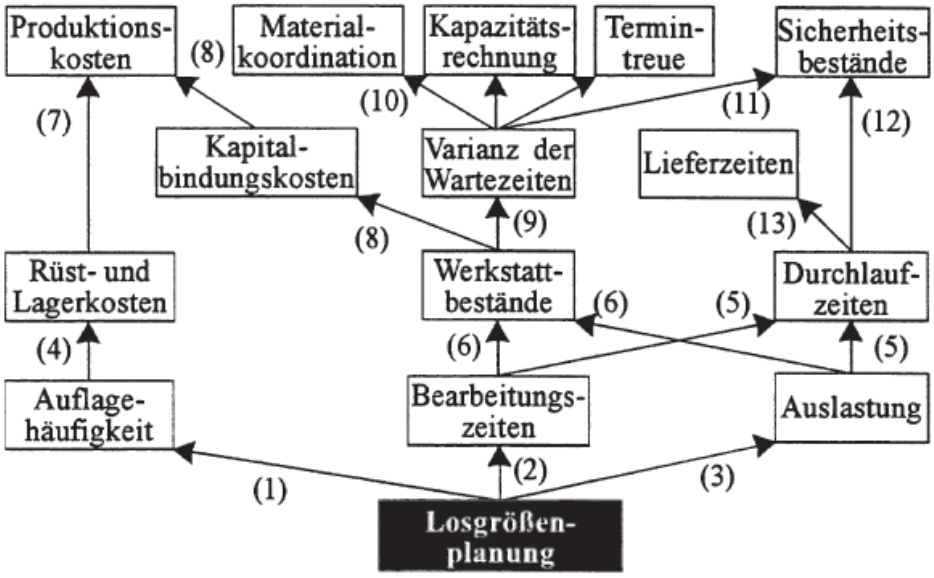


Abbildung 37: Einfluss der Losgrößen[223]

Im Kontext dieser Arbeit sind vor allem die leistungsbezogenen Zusammenhänge interessant. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung müssen jedoch alle Zusammenhänge beachtet werden und Entscheidungen auf Basis einer Bewertung von Kosten **und** Leistung getroffen werden.

4.1 Lose im Prozessablauf

Eine allgemeine Begriffsdefinition des Fertigungsloses wurde bereits in Kapitel 2.2.2 geliefert. Allerdings soll an dieser Stelle beim Begriff "Los" differenziert werden. Zum einen gibt es Prozesslose bzw. Fertigungslose, welche genau der obigen Beschreibung entsprechen. Die Fertigungslosgröße bestimmt die Fertigungsart. Das Merkmal der

[222] Söhner, 1995, S. 43
[223] Quelle: Söhner, 1995, S. 48

Fertigungsart gibt die Wiederholhäufigkeit und den Losgrößenumfang wieder. Dabei wird als ein Extremfall die Einmalfertigung bei einer Losgröße von 1, als anderes Extrem die Massenfertigung bei einer unendlichen Losgröße und beliebiger Auftragszeit definiert. Dazwischen sind Einzel- und Kleinserien- sowie Serienfertigung einzuordnen.[224]

Zum anderen gibt es Transportlose, welche jene Menge an Produkten beschreibt, welche gemeinsam in einem Transportgang von einer Arbeitsstation zur nächsten befördert werden.[225] Außerdem existieren noch Bestell- und Lieferlose, welche als die Bedarfs- und Angebotsmenge eines Produktes angesehen werden können. Abbildung 38 stellt die verschiedenen Losarten dar:

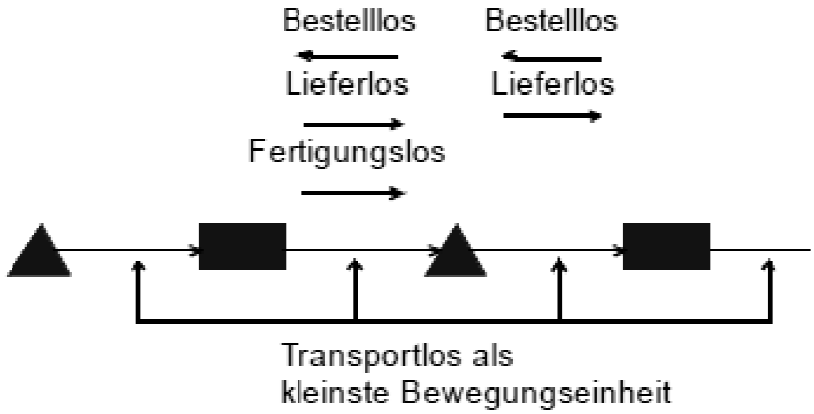


Abbildung 38: Arten von Losen[226]

Dangelmaier definiert die unterschiedlichen Arten von Losen sehr genau: "*Unter einem Bestelllos versteht man die (Bedarfs-) Menge an Faktoren einer Verbrauchsfaktorklasse, die bei gegebener mengen- und terminmäßiger Fixierung planmäßig am Anfang eines Bedarfsdeckungszeitraums am Vorgangs- (Bruttobedarf) oder Faktorknoten (Nettobedarf) eintrifft und bis zur nächsten Lieferung die Bedarfsdeckung sicherstellen soll. Ein Lieferlos ist die (Angebots-) Menge an Faktoren einer Verbrauchsfaktorklasse, die - ggf. als Antwort auf eine Bedarfsanmeldung - bei gegebener mengen- und terminmäßiger Fixierung, die nicht dem ursprünglichen Bestellos entsprechen muss, bis zum Ende eines Lieferzeitraums an einen Vorgangs- (Nettoangebot) oder Faktorknoten (Bruttoangebot) geliefert wird. Ein Fertigungslos ist die Menge an Faktoren einer Verbrauchsfaktorklasse, die bei gegebener mengen- und terminmäßiger Fixierung ohne Unterbrechung durch Vorgänge anderer Vorgangsklassen in einem Arbeitssystem als Output produziert wird. Besteht ein Fertigungslos aus mehreren Transportlosen, so ist zweckmäßig, das Fertigungslos als den „Fertigungsvorgang" zu betrachten, in den zu unterschiedlichen Zeitpunkten Transportlose*

[224] Großklaus, 1996, S. 91
[225] Hopp/Spearman, 2001, S.305
[226] Quelle: Dangelmaier, 2014, S. 27

eintreten bzw. austreten. Einheit für den Vorgang ist damit das Fertigungslos, für den Faktorfluss das Transportlos. Ein Transportlos ist die kleinste in einem Produktionssystem bewegte Menge an Faktoren einer Verbrauchsfaktorklasse."[227] In diesem Zitat stellen die "Faktoren einer Verbrauchsfaktorklasse" die herzustellenden Einheiten eines Produktes dar, ein Knoten beschreibt eine Arbeitsstation. Vor allem der Unterscheidung zwischen Transportlos und Fertigungslos kommt in Hinsicht auf die Durchlaufzeit eine große Bedeutung zu, wie die folgenden Abschnitte noch zeigen werden. Sind sie gleich groß, spricht man auch von "geschlossener Fertigung", bei welcher ein Auftrag - ein einzelnes Stück oder ein Los beliebiger Größe - in einer Stufe erst vollkommen fertiggestellt sein muss, bevor die Produktion in der nachfolgenden Stufe beginnen kann.[228] Diese geschlossene Produktion wird in den folgenden Abschnitten als "nonsplit - Fall" bezeichnet, da keine Losteilung während des Fertigstellungsprozesses des Produkts erfolgt. Der "split - Fall" lässt jedoch eine beliebige Teilung des Fertigungsloses in Transportlose und/oder Fertigungslose auf anderen Arbeitsstationen zu.

In den folgenden Abschnitten soll nun auf die unterschiedlichen Effekte, welche mit einer losweisen Fertigung einhergehen, näher eingegangen werden.

4.2 Einfluss der Prozesslosgröße

In den vorigen Kapiteln wurde die Ankunftsrate r_a erläutert. Diese begreift sich als Ankunftsrate *einzelner Teile*. Das bedeutet, die Ankunftsrate eines Loses, bestehend aus x Teilen, beträgt

$$r_{a,Los} = \frac{r_a}{x} \qquad \textbf{(4.1)}$$

$r_{a,Los}$ ... $Ankunftsrate\ des\ Loses\ [$
x ... $Losgröße\ [Stück]$

Die effektive Prozesszeit des Loses an einer Arbeitsstation ergibt sich analog zur Definition der Auftragszeit ZAU in Abschnitt 2.2.4 durch Rüstzeit, Losgröße und Bearbeitungszeit pro Einheit zu

$$t_{e,Los} = x * t_e + t_r \qquad \textbf{(4.2)}$$

$t_{e,Los}$ $effektive\ Prozesszeit\ für\ das\ Los\ (=ZAU)\ [Std]$
t_e $effektive\ Prozesszeit\ einer\ Einheit\ [Std]$
t_r $Rüstzeit\ [Std]$

[227] Dangelmaier, 2014, S. 27
[228] Adam, 1987, S. 26

Die sich dadurch ergebende Abfertigungsrate (Bedienrate, Prozessrate) ergibt sich damit zu

$$r_{e,Los} = \frac{1}{x * t_e + t_r} = \frac{1}{t_{e,Los}} \quad (4.3)$$

$r_{e,Los}$ *Bedienrate des Loses [1/Std]*
$t_{e,Los}$ *Losbearbeitungszeit (=Auftragszeit) [Std]*

Die Auslastung der Arbeitsstation beträgt schließlich

$$u = \frac{r_{a,Los}}{r_{e,Los}} = \frac{t_{e,Los}}{t_{a,Los}} = \frac{r_a}{x} * (x * t_e + t_r) \quad (4.4)$$

Die Wartezeit eines Loses vor der Arbeitsstation ergibt sich aus dem verwendeten Warteschlangenmodell. Ersetzt man im G/G/1- Modell die Bedienrate einzelner Teile durch die Bedienrate für das Los, so ergibt sich

$$ZW_{Los}(G|G|1) = (\frac{{c_{a,Los}}^2 + {c_{e,Los}}^2}{2}) * (\frac{u}{1-u}) * t_{e,Los} \quad (4.5)$$

und für die Durchlaufzeit des gesamten Loses durch die Arbeitsstation

$$ZDL_{Los}(G|G|1) = ZW + t_{e,Los} = t_{e,Los} * (1 + \left(\frac{{c_{a,Los}}^2 + {c_{e,Los}}^2}{2}\right) * \left(\frac{u}{1-u}\right)) \quad (4.6)$$

Nimmt man hier der Anschaulichkeit halber an, dass Ankunfts- und Bedienprozess poissonverteilt (also die Zwischenankunfts- und Bedienzeiten der Lose exponentialverteilt sind) sind, so vereinfacht sich die Gleichung für die Durchlaufzeit zu

$$ZDL_{Los}(M|M|1) = t_{e,Los} * \left(1 + \left(\frac{u}{1-u}\right)\right) \quad (4.7)$$

Setzt man nun für u und $t_{e,Los}$ gemäß den Gleichungen (4.4) und (4.2) ein, so erhält man nach einigen Umformungen

$$ZDL_{Los}(M|M|1) = \frac{x * (t_r + x * t_e)}{x - r_a * (t_r + x * t_e)} \quad (4.8)$$

Anhand dieser Gleichung lässt sich das Durchlaufzeitverhalten an einer Maschine abhängig von der gewählten Losgröße qualitativ vorstellen. Wird x sehr groß, so dominieren die Elemente der Gleichung, welche ein x enthalten (also vor allem die Bearbeitungszeiten), die Durchlaufzeit wächst proportional mit x an.[229]

$$\lim_{x \to \infty} ZDL_{Los} = x * t_e \qquad \textbf{(4.9)}$$

Wird hingegen x sehr klein, so dominiert ab einer gewissen Grenze die Rüstzeit (welche ja nicht von x abhängt). Die Zahl der Umrüstungen (und damit der für Rüstvorgänge benötigte relative Zeitanteil) steigt also stark an, damit steigt auch die Auslastung. Da bei hoher Auslastung die Wartezeit vor der Station stark zunimmt, steigt auch die Durchlaufzeit steil an.[230]

$$\lim_{x \to 0} ZDL_{Los} = \infty \qquad \textbf{(4.10)}$$

Grafisch lässt sich dieser Zusammenhang folgendermaßen darstellen:

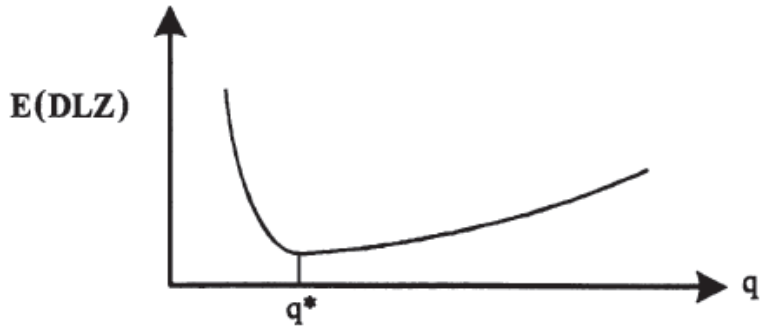


Abbildung 39: Zusammenhang Losgröße und Durchlaufzeit[231]

4.2.1 Loswartezeit, Losteilung

Bei losweiser Fertigung kommt für die Berechnung der Durchlaufzeit durch das Arbeitssystem zusätzlich zu der Wartezeit ZW_{Los} und der effektiven Prozesszeit $t_{e,Los}$ (siehe Gleichung (3.33)) noch ein weiterer Term dazu, nämlich die "Zeit des Wartens im Los" (ZWL). Dieser Ausdruck beschreibt den Umstand, dass die einzelnen Einheiten des Loses eine gewisse Zeit "im Los" an der Arbeitsstation verweilen müssen, da schließlich nur eine Einheit nach der anderen den Bearbeitungsprozess durchlaufen kann. Damit erweitert sich die in

[229] Söhner, 1995, S. 127
[230] Missbauer, 1998, S. 320
[231] Quelle: Söhner, 1995, S. 50

Abschnitt 2.2.7 erläuterte Definition der Durchlaufzeit eines Auftrages durch eine Arbeitsstation gemäß folgender Abbildung:

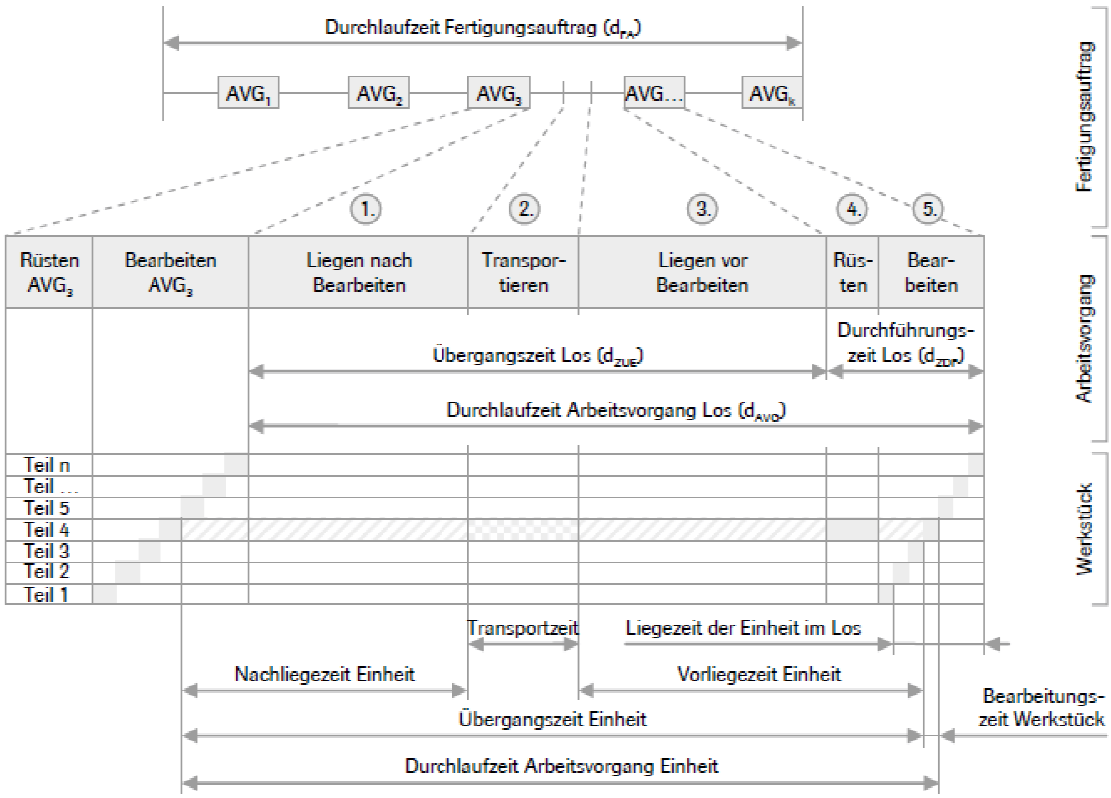


Abbildung 40:Elemente der Durchlaufzeit bei losweiser Bearbeitung[232]

Geht man von dem Fall aus, in der ein Los nur in seiner Gänze weitertransportiert wird (der bereits in Abschnitt 4.1 erwähnte nonsplit - Fall), bedeutet dies, dass jede Einheit des Loses auf die Bearbeitung der anderen x - 1 Einheiten des Loses warten muss, bevor es zur nächsten Station weitertransportiert werden kann.[233] Die Wartezeit ZWL beträgt also

$$ZWL_{nonsplit} = (x-1) * t_e \qquad \textbf{(4.11)}$$

$ZWL_{nonsplit}$ $\quad$ $Loswartezeit\ bei\ geschlossener\ Produktion$

Erlaubt man den Einheiten, den Bearbeitungsprozess nach der Bearbeitung sofort zu verlassen (das heißt, jede Einheit wird einzeln an die nächste Arbeitsstation weitertransportiert, dies beschreibt das Extrem des split - Falls), so wartet das erste Teil des Loses weder vor noch nach seiner Bearbeitung, das letzte Teil des Loses muss nur vor seiner Bearbeitung auf die x - 1 Teile vor ihm warten.[234] Die mittlere Wartezeit einer Einheit ergibt sich also zu

[232] Quelle: Burkhalter, 2010, S. 12
[233] Hopp/Spearman, 2001, S. 307
[234] Hopp/Spearman, 2001, S. 308

$$ZWL_{spli} = \frac{(x-1)}{2} * t_e \qquad \textbf{(4.12)}$$

ZWL_{split} $\quad$ $Loswartezeit\ bei\ einzelnem\ Weitertransport$

Nun lässt sich die gesamte Durchlaufzeit des Loses an der Station anschreiben als Summe aus Wartezeit des gesamten Loses (hinter anderen Losen), Wartezeit eines Einzelteils im Los, Bearbeitungszeit dieses Teils und der Rüstzeit.[235]

$$ZDL = ZW + t_e + t_r + ZWL \qquad \textbf{(4.13)}$$

Durch Einsetzen der Gleichung (4.11) bzw. Gleichung (4.12) in Gleichung (4.13) erhält man :[236]

$$ZDL_{nonsplit} = ZW + t_r + x * t_e \qquad \textbf{(4.14)}$$

$ZDL_{nonsplit}$ $\quad$ $Durchlaufzeit\ des\ Loses\ bei\ geschlossenem\ Transport$

bzw.

$$ZDL_{split} = ZW + t_r + \frac{x+1}{2} * t_e \qquad \textbf{(4.15)}$$

ZDL_{split} $\quad$ $Durchlaufzeit\ des\ Loses\ bei\ einzelnem\ Weitertransport$

Es macht also einen Unterschied, wie man den Materialfluss steuert. Durch Aufteilung von Fertigungslosen in mehrere kleine Transportlose lassen sich, abhängig von der Größe des Fertigungsloses, teilweise erhebliche Durchlaufzeitverkürzungen erzielen. Die folgende Abbildung zeigt qualitativ die Auswirkung der Losteilung (Daten aus dem Praxisteil, Transportlosgröße = 1), in Beispiel 1 des praktischen Teils soll noch etwas näher darauf eingegangen werden.

[235] Hopp/Spearman, 2001, S. 308
[236] Herleitung siehe Hopp/ Spearman, 2001

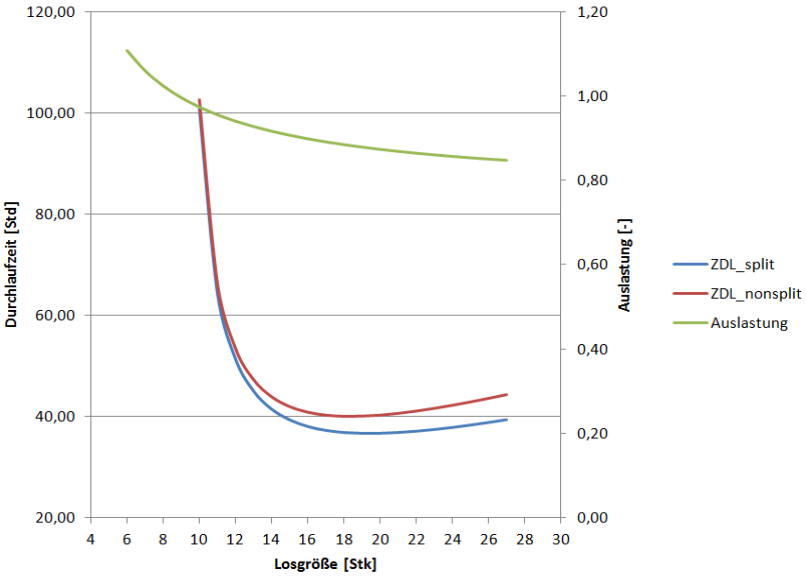


Abbildung 41: Auswirkung der Losteilung[237]

4.2.2 Sonderfall: Parallel-Losfertigung

In manchen Fällen ist es erforderlich, dass sich das Los vor der Arbeitsstation sammeln muss, um in seiner Gänze auf einmal bearbeitet zu werden. Dies trifft z.B. auf Brennöfen zu, welche nicht einzelne Teile brennen, sondern viele gleichzeitig. Damit verbunden ist eine weitere Ergänzung in der Berechnung der Durchlaufzeit, die "Wartezeit auf Losbildung" (ZWLB). Dieser Term muss auch in Produktionsvorgängen berücksichtigt werden, wo sich Lose vor dem Weitertransport sammeln müssen. Da das erste Teil eines Loses, bestehend aus x gleichartigen Teilen, auf x - 1 Teile warten muss, bevor es bearbeitet werden kann, das letzte Teil jedoch sofort nach seiner Ankunft bearbeitet wird (da das Los mit ihm komplett ist), ergibt sich die ZWLB zu[238]

$$ZWLB = \frac{x-1}{2 * r_a} \qquad \textbf{(4.16)}$$

$ZWLB$ $\quad Wartezeit\ auf\ Losbildung\ [Std]$

Die Durchlaufzeit eines solchen Prozesses folgt damit zu

$$ZDL = ZW + t_r + t_e + ZWLB \qquad \textbf{(4.17)}$$

[237] Quelle: Hopp/Spearman, 2001, S. 307
[238] Hopp/Spearman, 2001, S. 310

4.2.3 Transportlose

Für Transportlose gelten im Prinzip dieselben Zusammenhänge wie für die Parallel-Losfertigung. Eine Einheit muss vor ihrem Weitertransport zur nächsten Arbeitsstation auf die anderen x_{Tr} - 1 Einheiten des Transportloses mit der Größe x_{TR} warten. Damit gilt unter der Voraussetzung, dass die Ankunftsrate an der Transportlosbildung nach der Station gleich der Ankunftsrate am Prozess ist (*Erhaltung des Materialflusses - siehe Abschnitt 3.4.4*), analog zu Abschnitt 4.2.2 die Gleichung[239]

$$ZWLB_{TR} = \frac{x_{TR} - 1}{2 * r_a} \qquad \textbf{(4.18)}$$

$ZWLB_{TR}$	$Wartezeit\ auf\ Transportlosbildung\ [Std]$
x_{TR}	$Transportlosgröße\ [Stk]$
r_a	$Ankunftsrate\ [1/Std]$

Bezüglich der Durchlaufzeit lässt sich festhalten, dass diese annähernd linear mit der Transportlosgröße ansteigt. Außerdem ist der Einfluss der Transportlosgröße bei niedrig ausgelasteten Stationen am größten, da die Ankunftsrate hier sehr klein ist und es daher sehr lange dauert, um das Transportlos aufzufüllen.[240]

4.2.4 Montagevorgänge

Die meisten Produktionsvorgänge beinhalten Montageprozesse, wo Erzeugnisse aus verschiedenen vorgelagerten Fertigungsprozessen (und/oder Lieferteilen) zusammengebaut werden. Dabei ist zu beachten, dass die Performance des Montageprozesses genauso wie Fertigungsprozesse über Variabilität verfügt. Hopp und Spearman halten fest, dass die Performance einer Montagestation reduziert wird durch eine Steigerung

- der Anzahl der zusammenzubauenden Komponenten
- der Variabilität der Ankunftsprozesse
- eine mangelnde Koordination der Ankunftsprozesse

Allerdings ist eine exakte mathematische Bestimmung dieser Einflüsse nur sehr schwer realisierbar. Sie werden daher zumeist nur abgeschätzt.[241]

4.2.5 Variabilitätseffekte durch losweise Fertigung (Variability Pooling)

Durch Bildung von Losen verringert sich die Streuung der Verteilung gegenüber den Verteilungsparametern einzelner Teile. Dies gilt sowohl für die Variabilität des

[239] Hopp/Spearman, 2001, S. 313
[240] Hopp/Spearman, 2001, S. 312 ff.
[241] Hopp/Spearman, 2001, S. 316

Ankunftsprozesses als auch für die Variabilität des Bearbeitungs- (Abfertigungs-) Prozesses. Der Variationskoeffizient eines Loses ergibt sich, abhängig von der Losgröße x, zu[242]

$$c_{Los} = \frac{c}{\sqrt{x}} \qquad (4.19)$$

c_{Los} *Variationskoeffizient eines Fertigungsloses [-]*

Dieser Effekt lässt sich leicht anhand von Analogien aus der Finanzwelt erklären, wo das Risiko einzelner Wertpapiere durch Bildung von Portfolios verringert (bzw. ausgeglichen) wird. Je größer das Portfolio, desto besser werden sich die einzelnen Wertpapiere hinsichtlich ihres Risikos ausgleichen, wodurch das Gesamtrisiko sinkt.[243]

An dieser Stelle lässt sich auch der in Abschnitt 2.4.5 erwähnte Effekt einer möglichen Blockierung der Arbeitsstation durch große Aufträge ansatzweise erklären. Steigt die Losgröße eines Auftrages, so verringert sich der Variationskoeffizient der Gesamtbearbeitungszeit zwar, jedoch nur unterproportional zur Losgröße:

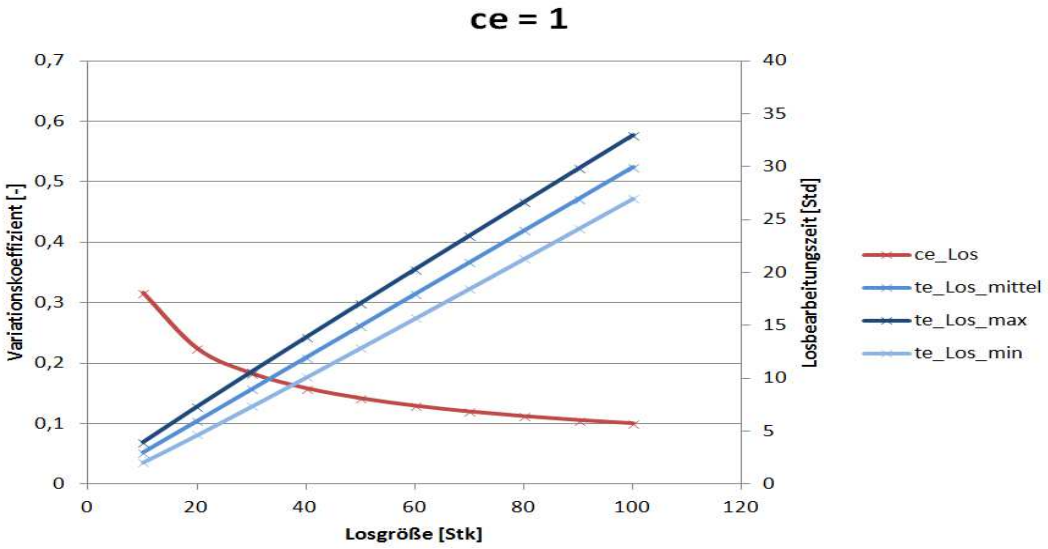


Abbildung 42: mögliche Bearbeitungsdauern bei losweiser Bearbeitung und c_e = 1

Bei der obenstehenden Abbildung wurde ein Prozess mit einer mittleren Bearbeitungszeit pro Stück von 0,3 Stunden und einem Variationskoeffizienten von 1 angenommen. Das bedeutet, die Bearbeitungszeiten sind exponentialverteilt. Nun wird die Losgröße zwischen 10 und 100 Stück variiert. Die rote Linie zeigt den Verlauf des Variationskoeffizienten für die Losbearbeitungszeit (siehe Gleichung (4.19)). Es ergibt sich ein "Korridor" für die möglichen Losbearbeitungszeiten, welcher sich mit steigender Losgröße weitet. Das bedeutet, dass in diesem Beispiel Lose zu 100 Stück eine Bearbeitungszeit von bis zu 33 Stunden in Anspruch nehmen können (bei einem Erwartungswert von 30 Stunden, Rüstzeiten wurden hier

[242] Hopp/Spearman, 2001, S. 280
[243] Hopp/Spearman, 2001, S. 280

vernachlässigt). Tritt dieser Fall ein, so müssen nachfolgende Aufträge 3 Stunden länger als geplant auf ihre Bearbeitung warten, die Arbeitsstation ist damit blockiert. Die Variabilität des Prozesses nimmt also mit zunehmender Größe des zu bearbeitenden Loses ab ($c_{e,Los}$ wird kleiner), jedoch werden die absoluten möglichen Schwankungen der Gesamtbearbeitungszeit größer. Je größer der Variationskoeffizient der Einzelbearbeitungszeiten ist, desto stärker wirkt sich dieser Effekt aus. Die folgenden Abbildungen zeigen zum Vergleich denselben Prozess mit $c_e = 2$ (hoch variabler Prozess) und $c_e = 0{,}3$ (wenig variabler Prozess):

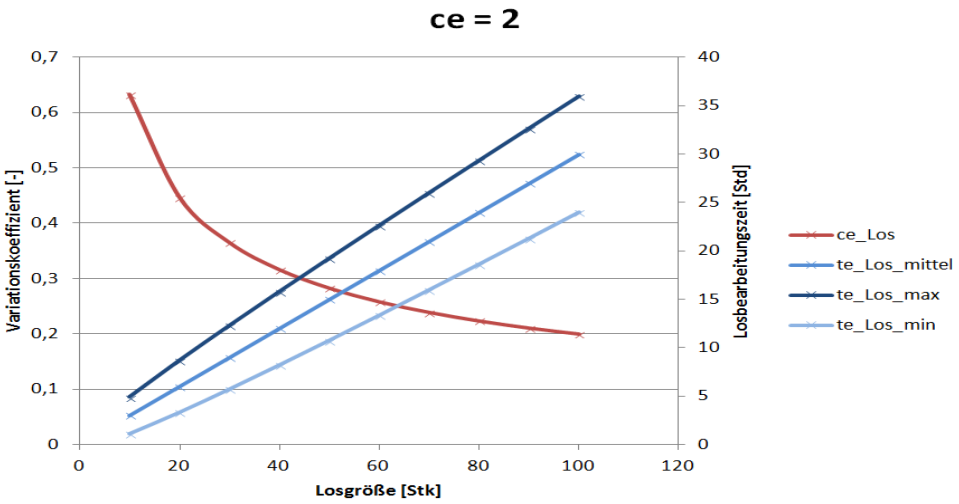


Abbildung 43: mögliche Bearbeitungsdauern bei losweiser Bearbeitung und $c_e = 2$

Bei hoher Variabilität weitet sich der erwähnte Korridor sehr stark aus, hier sind Bearbeitungszeiten von 36 Stunden für 100 Stück möglich.

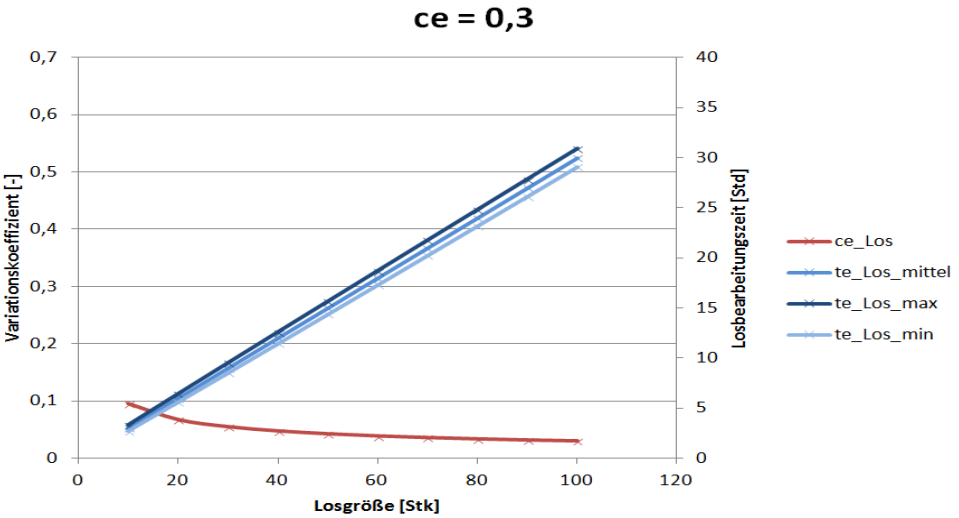


Abbildung 44: mögliche Bearbeitungsdauern bei losweiser Bearbeitung und ce = 0,3

Bei einem sehr gut kontrollierten Prozess streuen die Bearbeitungszeiten nicht sehr stark, hier treten auch bei einer Losgröße von 100 Stück nur Schwankungen von 0,9 Stunden auf.

Anmerkung: *Dieser Effekt wurde in Simulationsstudien durch Variation im Auftragsmix untersucht, dabei konnten Durchlaufzeitunterschiede festgestellt werden, allerdings sind für eine genauere Beschreibung der Auswirkung noch weitere Untersuchungen notwendig, welche den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden.*

4.3 Losfertigung an einer Arbeitsstation - Zusammenfassung

Mit den Erläuterungen der letzten Abschnitte besitzt man nun Kenntnis über alle Komponenten der Durchlaufzeit an einer Arbeitsstation.

$$ZDL = ZTR + ZW + t_r + t_e + ZWLB + ZWLB_{TR} + ZWL + ZWM \qquad \textbf{(4.20)}$$

ZTR	$Transportzeit\ [Std]$
ZW	$Wartezeit\ [Std]$
tr	$Rüstzeit$
te	$effektive\ Prozesszeit\ [Std]$
$ZWLB$	$Losbildungzeit\ [Std]$
$ZWLB_{TR}$	$Transportlosbildungszeit\ [Std]$
ZWL	$Wartezeit\ im\ Los\ [Std]$
ZWM	$Wartezeit\ bei\ Montagevorgängen\ [Std]$

Von all diesen Anteilen an der Durchlaufzeit ist ausschließlich die effektive Prozesszeit wirklich an der Bearbeitung des Auftrags, also am Wertschöpfungsprozess, beteiligt, alle anderen Elemente tragen nicht zur Wertschöpfung bei. Die Rüstzeit wird allerdings dem Produktionsprozess zugeschlagen und bildet zusammen mit der Prozesszeit die Auftragszeit ZAU und in der Folge die Durchführungszeit ZDF. Alle anderen Terme sind Elemente der bereits in Abschnitt 2.2.6 erwähnten Übergangszeit ZUE. Weiters ist zu beachten, dass nicht alle in der obigen Gleichung enthaltenen Terme in jedem Fertigungsablauf zu berücksichtigen sind. Es kommt dabei auf die Charakteristik der einzelnen Arbeitsvorgänge und das Transportverhalten zwischen den Arbeitsstationen an.

4.4 Ausweitung des Modells auf Mehrproduktfälle

Eine Maschine bzw. eine Arbeitsstation wird nur sehr selten von einem einzigen Auftrag durchlaufen. Zumeist durchlaufen viele verschiedene Produkte im Zuge ihrer Herstellung dieselbe Maschine. Dabei können die Bearbeitungszeiten an der Maschine für die verschiedenen Aufträge variieren (z.B. kann eine Bohrstation in ein Produkt 4 Löcher bohren, in ein anderes jedoch 6). Ebenso können die Rüstzeiten für die unterschiedlichen Produktarten an den jeweiligen Stationen unterschiedlich sein. Jedoch werden hier die mittleren Ankunftsintervalle und Losbearbeitungszeiten für den Auftragsmix nicht einfach durch Bildung des arithmetischen Mittelwerts der verschiedenen Auftragszeiten gebildet, wie dies beispielsweise in der Kennlinientheorie erfolgt (vergleiche Gleichung (2.7)). Vielmehr müssen die Aufträge nach ihrer Losgröße bzw. mit ihrer Anzahl gewichtet werden,

da die Losgrößen der unterschiedlichen Aufträge zu unterschiedlich starkem Einfluss derselben auf die Streuung der Bedienungszeiten führen.[244]

Werden J verschiedene Aufträge an einer Arbeitsstation bearbeitet, so muss zuerst die *mittlere* Zwischenankunftszeit der Aufträge ermittelt werden. Diese stellt sozusagen den "Mittelwert der Mittelwerte" der losspezifischen Losankunftsprozesse dar:[245]

$$t_{a,Los,m} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{J} \frac{1}{t_{a,Los,i}}} \qquad \textbf{(4.21)}$$

$t_{a,Los,m}$ $\quad Mittelwert\ der\ Loszwischenankunftszeiten\ [Std]$
$t_{a,Los,i}$ $\quad Zwischenankunftszeit\ des\ Auftrages\ i\ [Std]$

Im zweiten Schritt lässt sich die *mittlere* Bedienzeit des Auftragsmixes an der Station berechnen. Dies ist der Durchschnitt der mittleren Bedienungszeiten der einzelnen Lose j (also der Mittelwert der Mittelwerte, vergleiche Abschnitt 2.3.5), wobei die Bedienungszeit eines jeden Loses analog zur Zwischenankunftszeit mit seiner Losanzahl zu gewichten ist:

$$t_{e,Los,m} = t_{a,Los,m} * \sum_{i=1}^{J} \frac{t_{e,Los,i}}{t_{a,Los,i}} \qquad \textbf{(4.22)}$$

$t_{e,Los,m}$ $\quad mittlere\ Bedienzeit\ des\ Auftragsmixes\ [Std]$
$t_{e,Los,i}$ $\quad Losbearbeitungszeit\ des\ Auftrags\ i\ [Std]$

Die Varianz der Bedienungszeiten, welche die Abweichungen der Bedienungszeiten der einzelnen Lose von der mittleren Bedienzeit misst, errechnet sich zu[246]

$$\sigma_{e,Los,m}{}^2 = t_{a,Los,m} * \sum_{i=1}^{J} \left(\frac{1}{t_{a,Los,i}} * (t_{e,Los,i} - t_{e,Los,m})^2\right) \qquad \textbf{(4.23)}$$

σ_{e,Los,m^2} $\quad Varianz\ der\ Losbearbeitungszeiten\ [Std^2]$

Hopp und Spearman berücksichtigen auch die Varianz der Bearbeitungszeiten innerhalb der Lose und eine eventuelle Varianz der Rüstzeiten (z.B. bei auftragsabhängigem Rüsten).[247] Damit erweitert sich die Berechnungsgleichung für die Varianz des Produktmixes zu:

[244] Missbauer, 1998, S. 322
[245] Hopp/Spearman, 2001, S. 318
[246] Missbauer, 1998, S. 322
[247] Hopp/Spearman, 2001, S. 505

$$\sigma_{e,Los,m}{}^2 = t_{a,Los,m} * \left(\sum_{i=1}^{J} \frac{1}{t_{a,Los,i}} * \left(t_{e,Los,i} - t_{e,Los,m}\right)^2 + \sum_{i=1}^{J} \frac{1}{t_{a,Los,i}} * \left(x_i * c_{e,i}{}^2 * t_{e,i}{}^2 + c_{r,i}{}^2 * t_{r,i}{}^2\right)\right) \quad \textbf{(4.24)}$$

$c_{e,i}$ *Variationskoeffizient der Stückbearbeitungszeiten innerhalb des Loses i [-]*
$t_{e,i}$ *Mittelwert der Stückbearbeitungszeit des Auftrags (Loses) i [Std]*
$c_{r,i}$ *Variationskoeffizient der Rüstzeiten des Auftrags i [-]*
$t_{r,i}$ *mittlere Rüstzeit des Auftrags i [Std]*

Der erste Teil der Gleichung (4.24) beschreibt die Abweichung der Mittelwerte der einzelnen Aufträge vom gemeinsamen Mittelwert (= ZAU_v in der Kennlinientheorie). Der zweite Teil berücksichtigt die Streuung innerhalb der unterschiedlichen Lose, da schließlich manche Aufträge - z.B. technologisch bedingt - besser beherrschbar sind als andere.

Schließlich ergibt sich der Variationskoeffizient der Bearbeitungszeiten im Mehrproduktfall zu:

$$c_{e,Los,m} = \frac{\sigma_{e,Los,m}}{t_{e,Los,m}} \quad \textbf{(4.25)}$$

$c_{e,Los,m}$ *Variationskoeffizient des Auftragsmixes [-]*

Die mittlere Auslastung der Station ergibt sich schließlich wieder als Quotient aus mittlerer Bearbeitungszeit und mittlerer Zwischenankunftszeit zu

$$u_m = \frac{t_{e,Los,m}}{t_{a,Los,m}} = \sum_{i=1}^{J} \frac{t_{e,Los,i}}{t_{a,Los,i}} \quad \textbf{(4.26)}$$

u_m *mittlere Auslastung der Arbeitsstation im Mehrproduktfall [-]*

Bei einer Station, die mehrere Aufträge zu bearbeiten hat, können die so ermittelten Werte in die Gleichungen (4.5) und (4.6) eingesetzt werden, dadurch erhält man Mittelwerte für die Wartezeit

$$ZW_m(G/G/1) = \left(\frac{c_{a,Los,m}{}^2 + c_{e,Los,m}{}^2}{2}\right) * \left(\frac{u_m}{1-u_m}\right) * t_{e,Los,m} \quad \textbf{(4.27)}$$

ZW_m *mittlere Wartezeit im Mehrproduktfall [Std]*

und in Folge auch für die Durchlaufzeit

$$ZDL_m\ (G|G|1) = ZW_m + t_{e,Los,m} \qquad \textbf{(4.28)}$$

$ZDLm$ *mittlere Durchlaufzeit im Mehrproduktfall [Std]*

Die Durchlaufzeit eines bestimmten Auftrages aus dem vorliegenden Produktmix erhält man über die mittlere Wartezeit plus der Bearbeitungszeit des betreffenden Auftrags:

$$ZDL_i\ (G|G|1) = ZW_m + t_{e,Los,i} \qquad \textbf{(4.29)}$$

ZDL_i *Durchlaufzeit des Auftrags i im Mehrproduktfall [Std]*

In den folgenden Grafiken ist für eine Arbeitsstation, welche 2 Produktarten bearbeitet, der Verlauf der mittleren Bearbeitungszeit sowie die sich daraus ergebenden mittlere Wartezeit- und Durchlaufzeitverläufe in Abhängigkeit der gewählten Losgrößen dargestellt.

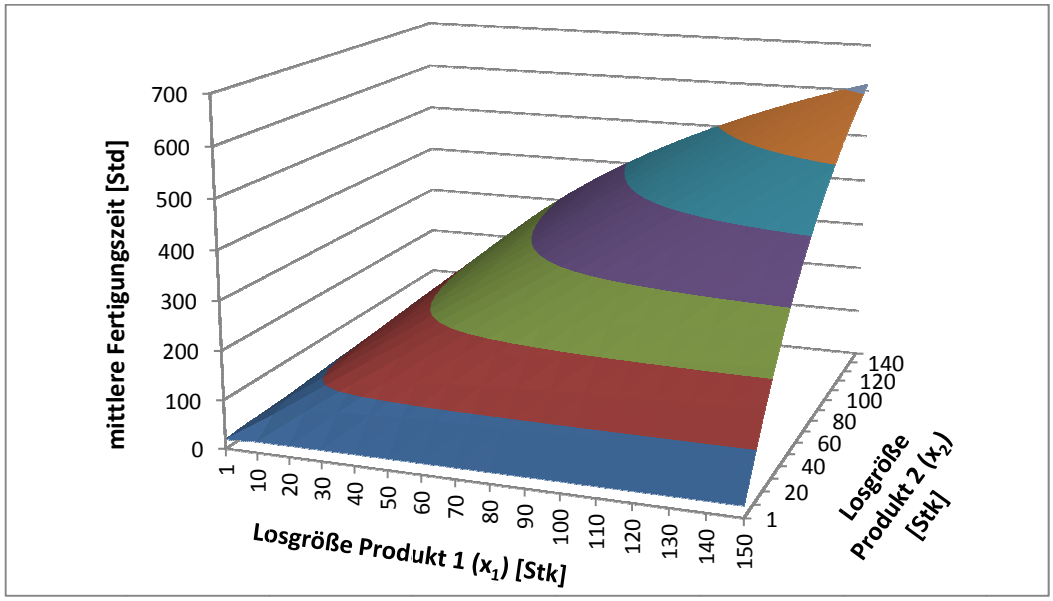


Abbildung 45: mittlere Prozesszeit im 2-Produkt-Fall[248]

Die mittlere Bearbeitungszeit (= $t_{e,Los,m}$) ist also (bei gleicher Variation der Parameter) eine konkave Funktion der Losgrößen x_1 und x_2. Dieser Umstand resultiert aus der Tatsache, "*dass bei Verringerung der Losgröße eines Produkts dessen Bedienungszeit linear sinkt, die Anzahl der Lose dieses Produktes jedoch progressiv steigt, so dass die betreffende Produktart mit größerem Gewicht in die Berechnung der mittleren Bedienungszeit (= $t_{e,Los,m}$, Anm.) eingeht*."[249] Für den Grenzfall x_i = 0 würde die Anzahl an Losen dieses Produkts gegen Unendlich laufen, die mittlere Bearbeitungszeit besteht sodann nur noch aus der Rüstzeit für dieses Produkt, die anderen Produkte spielen dann keine Rolle mehr. Im oben gezeigten

[248] Quelle: eigene Darstellung
[249] Missbauer, 1998, S. 324

Beispiel wurde eine Rüstzeit von 8 Stunden angenommen, daher kann dieser Wert auch niemals unterschritten werden.

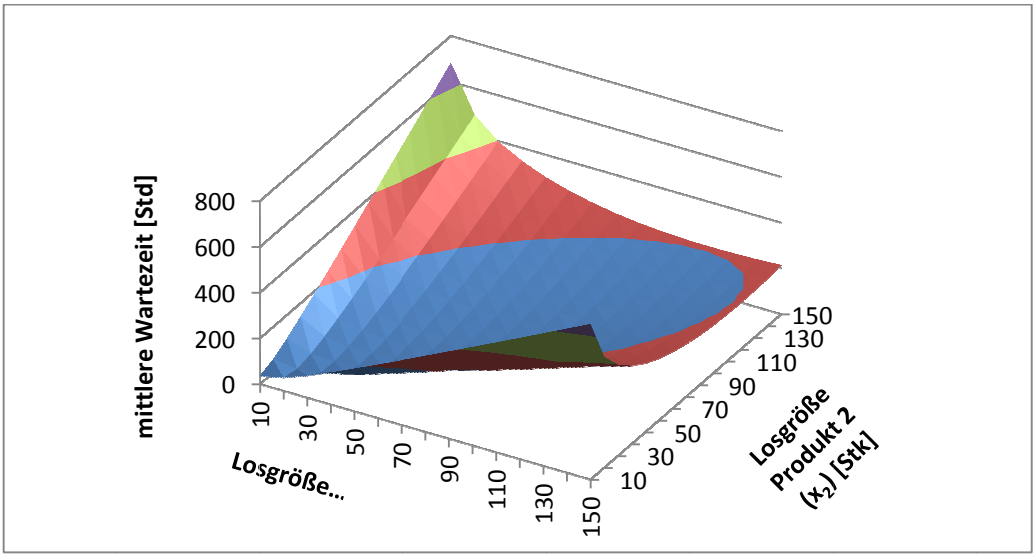


Abbildung 46: mittlere Wartezeit im 2-Produkt-Fall[250]

Die Wartezeit vor der Station stellt eine konvexe Funktion der Losgrößen dar. Dies resultiert aus der Tatsache, dass bei gleichen Losgrößen die Varianz gemäß Gleichung (4.23) minimiert wird und damit die Wartezeit bei gleichbleibender Auslastung ebenfalls ein Minimum erreicht. Je weiter die Losgrößen der beiden Produkte auseinanderliegen, desto höher wird der Wert von $c_{e,Los,m}$ und damit die mittlere Wartezeit. Die mittlere Durchlaufzeit ergibt sich schließlich gemäß Gleichung (4.28) durch Addition der Verläufe von Bearbeitungs- und Wartezeit. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Durchlaufzeit für das aktuelle Beispiel:

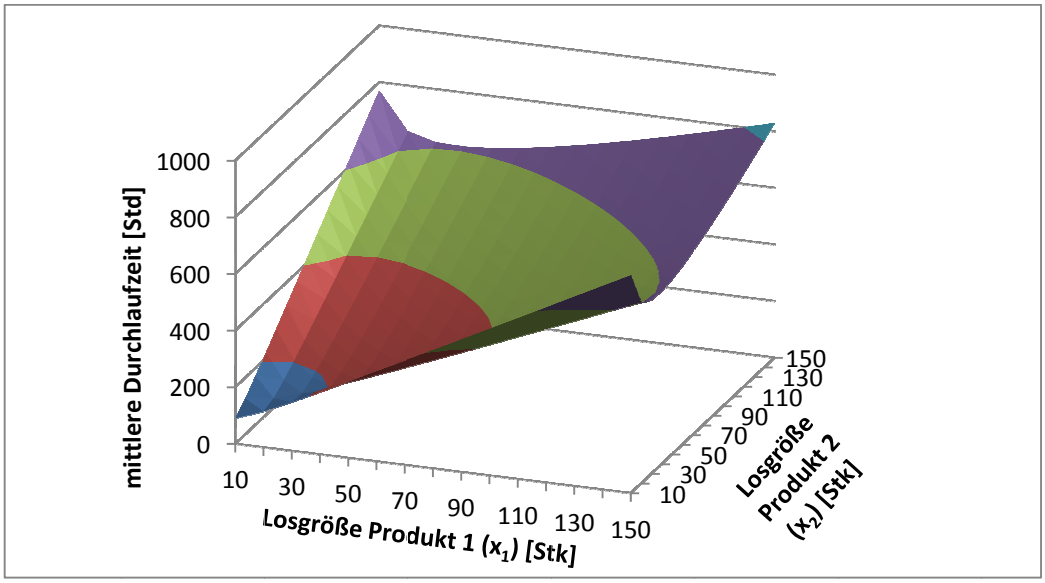


Abbildung 47: mittlere Durchlaufzeit im 2-Produk-Fall[251]

[250] Quelle: eigene Darstellung

Bei J > 2 lassen sich die Verläufe nur noch in mehrdimensionalen Koordinatensystemen darstellen bzw. mittels Durchrechnungen für einzelne Kombinationen annähern. Wichtig ist dabei anzumerken, dass sich der für die Durchlaufzeit ergebende Verlauf im Allgemeinen als keine konvexe Funktion (ab J > 2) darstellt und daher auch - im Hinblick auf die Optimierung - kein eindeutiges Minimum aufweist.[252] Der Verlauf der Durchlaufzeit entsteht bekanntlich durch Addition des Verlaufs der Bearbeitungszeit bzw. Prozesszeit (konkav, siehe Abbildung 45) und Wartezeit (konvex, siehe Abbildung 46). Bei niedriger Auslastung bestimmt daher der Bearbeitungszeitanteil, bei hohen Auslastungen der Wartezeitanteil die Form des Durchlaufzeitverlaufes.[253] Dieses Problem kann jedoch umgangen werden, indem man eine hohe Auslastung voraussetzt, bei welcher die Durchlaufzeit sehr gut durch die Wartezeit angenähert werden kann, da diese dann ein Vielfaches der Bedienungszeit ausmacht. Der Verlauf der Wartezeit wiederum stellt eine konvexe Funktion dar.[254] Niedrige Auslastungen bewirken sehr niedrige Wartezeiten, sodass das Thema der Wartezeit- und damit Durchlaufzeitminimierung in erster Linie bei hohen Auslastungen relevant ist.

4.4.1 Verwendung von Richtlosgrößen

Um der sehr schnell sehr umfangreich werdenden Berechnung der Zielfunktionswerte (also der Durchlaufzeiten für die verschiedenen Losgrößenkombinationen) Herr zu werden, bedient man sich üblicherweise gewisser Heuristiken bzw. Näherungsverfahren. Diese haben die Aufgabe, Richtlosgrößen zu finden, welche zumindest in der Nähe der optimalen Losgrößen liegen. Damit erspart man sich sehr viel Rechenarbeit im Hinblick auf die Auswahl optimaler Kombinationen.[255] Jedoch auch für die Analyse der Einflüsse unterschiedlicher Kombinationen soll im weiteren zuerst ein Stück weit "optimiert" werden, damit die Ergebnisse eine gewisse Realitätsnähe und vor allem eine hohe Aussagekraft erhalten (da das interessante Verhalten der Zielfunktion rund um das Minimum auftritt). Vor allem in der Serienlosfertigung mit J > 2 ist dies ein gängiger Weg, da ansonsten der Rechenaufwand mit jedem zusätzlichen Produkt überproportional zunehmen würde und schon bald nicht mehr wirtschaftlich ist. In den folgenden Abschnitten sollen einige der für diese Arbeit wesentlichsten "Näherungsverfahren" kurz erläutert werden.

4.4.1.1 partielle Optimierung

Bei der partiellen Optimierung verwendet man für eine beliebige Kombination der Losgrößen die Formeln (4.27) und (4.28), um die Zielfunktion, also ZDL_m auszudrücken. Danach verändert man in zuerst relativ großen Schritten *eine* der Losgrößen, z.B. $x_{1,}$ zu

[251] Quelle: eigene Darstellung
[252] Söhner, 1995, S. 128
[253] Missbauer, 1998, S. 321
[254] Missbauer, 1998, S. 327
[255] Söhner, 1995, S. 132

größeren bzw. kleineren Werten.[256] Dies führt man so lange durch, bis die Zielfunktion keine kleineren Werte mehr liefert. Danach geht man für x_2 genauso vor. Wichtig ist dabei, die erste Losgröße am modifizierten Wert "festzuhalten". Hat man den ersten Iterationsvorgang abgeschlossen, so führt man das Ganze noch einmal mit kleineren Schrittweiten durch. Der Vorgang wird solange fortgesetzt, bis sich keine Verkleinerungen des Zielwertes mehr erreichen lassen. Im Kontext dieser Arbeit reichen dabei zumeist wenige Iterationsschritte aus, da das Ziel nicht darin besteht, die genau optimale Lösung zu finden, sondern einen vernünftigen Ausgangspunkt für die Abbildung der Abhängigkeiten zu finden. Interessant ist in diesem Zusammenhang noch die Anmerkung, dass im "optimalen" Bereich "*die Zielfunktion (4.28) nur wenig sensitiv gegenüber kleineren Veränderungen des Losgrößenvektors reagiert. Dies bedeutet, dass z.B. (bei vier Produkten, Anm.) die Losgrößenkombination (120,170,90,320) auf nahezu die gleiche mittlere Durchlaufzeit führen kann, wie die Kombination (125,165,85,330). Dieser Sachverhalt lässt sich dadurch erklären, dass es zwischen den Losgrößen gewisse Substitutionsmöglichkeiten gibt. Dies bedeutet, dass sich die mittlere Gesamtdurchlaufzeit nicht oder zumindest nur unwesentlich ändert, wenn die Losgröße eines Produktes verkleinert und die eines anderen dafür entsprechend vergrößert wird. Dadurch lässt sich häufig ein Ausgleich sowohl im Hinblick auf die umrüstbedingte Auslastung als auch auf die Höhe der Variabilitäten erzielen. Es liegt auf der Hand, dass diese Substitutionsmöglichkeiten mit der Zahl der Produkte steigen.*"[257]

Die partielle Optimierung liefert anschauliche Ergebnisse, da man während den Iterationsschritten die Veränderungen der Zielfunktion beobachten kann. Jedoch ist es noch immer eine "Trial and Error" Methode und dementsprechend aufwendig.

4.4.1.2 optimale Auslastung

In ihrem Werk "Factory Physics" gehen die Autoren Hopp und Spearman einen etwas anderen Weg. Ausgehend vom Einproduktfall definieren sie die produktive Auslastung u_0.

$$u_0 = r_a * t_e = \frac{t_e}{t_a} \qquad \textbf{(4.30)}$$

u_0 *produktive Auslastung (Auslastung durch Fertigen) [-]*

In weiterer Folge lässt sich die Losbearbeitungszeit aus Formel (4.2) durch Umformungen auch folgendermaßen schreiben:

[256] Söhner, 1995, S. 124 ff.
[257] Söhner, 1995, S. 125

$$t_{e,Los} = \frac{t_r * u}{u - u_0} \quad \textbf{(4.31)}$$

u *Auslastung [-]*

Damit lässt sich die Bearbeitungszeit und in Folge auch die Durchlaufzeit nur noch in Abhängigkeit von der Auslastung darstellen. Dadurch lässt sich die Zielfunktion (= DLZ) minimieren, indem man u optimiert. Dies erreicht man dadurch, dass man die Zielfunktion nach u ableitet und gleich Null setzt. Für den Fall, dass $c_e = 1$ gilt, ergibt sich[258]

$$u^x = \sqrt{u_0} \quad \textbf{(4.32)}$$

u^x *optimale Auslastung*

Setzt man die so gefundene Auslastung in die Gleichung (4.4) ein, so erhält man eine durchlaufzeitoptimale Losgröße. Obwohl dieser Rechengang eigentlich nur für den Fall von exponentialverteilten Bedienungszeiten exakt ist, hat sich gezeigt, dass vor allem bei hohen Auslastungsgraden die Beziehung auch für andere c_e - Werte in ausreichender Genauigkeit gilt.[259]

Für den Mehrproduktfall gilt diese Approximation analog. Betrachtet man die Definition der Durchlaufzeit in Gleichung (4.28) in Verbindung mit (4.27), so erkennt man, dass das Finden von Werten $x_{i,}$ mit welchen sich u^x erreichen lässt, sowie das Kleinhalten von $c_{e,Los,m}$ und $t_{e,Los,m}$ zu einer geringen, "optimalen" Durchlaufzeit führen sollte. Dies wird erreicht, indem man die durchschnittliche Losbearbeitungszeiten $t_{e,Los,m}$ minimiert und die einzelnen Losbearbeitungszeiten $t_{e,Los,i}$ gleichsetzt.[260] Man erhält

$$L = \frac{\sum_{i=1}^{J} r_{a,i} * t_{r,i} * t_{e,i}}{u^x - u_0} + t_{r,m} \quad \textbf{(4.33)}$$

L *Hilfswert zur Losgrößenoptimierung [Std]*

und schließlich für die optimale Losgröße des Auftrages i

$$x_i{}^x = \frac{L - t_{r,i}}{t_{e,i}} \quad \textbf{(4.34)}$$

$x_i{}^x$ *optimale Losgröße für Produkt i [Stk]*
$t_{r,i}$ *Rüstzeit für Produkt i [Std]*
$t_{e,i}$ *Stückbearbeitungszeit für Produkt i [Std]*

[258] Herleitung siehe Hopp/Spearman, 2001, S. 502 ff.
[259] Hopp/Spearman, 2001, S. 503
[260] Herleitung siehe Hopp/Spearman, 2001, S. 504 ff.

Bei Parallellosfertigung verläuft der Rechengang etwas anders, darauf soll an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden. Es sollen nur die Ergebnisgleichungen angeführt werden:[261] Es wird zunächst die produktive Auslastung für eine Losgröße von 1 ermittelt:

$$u_m = r_a * t_e \qquad \textbf{(4.35)}$$

u_m *Auslastung bei Losgröße x = 1*

Danach ergibt sich die optimale Auslastung als Funktion der produktiven Auslastung:

$$u^x = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{{c_a}^2}{(u_m * (1 + c_{e,Los})} + {c_{e,Los}}^2}} \qquad \textbf{(4.36)}$$

u^x *optimale Auslastung der Arbeitsstation [-]*

Die dazugehörige Losgröße ergibt sich schließlich zu:

$$x^x = \frac{u_m}{u^x} \qquad \textbf{(4.37)}$$

x^x *optimale Losgröße*

4.4.1.3 optimale mittlere Fertigungszeit

Diese Vorgehensweise stellt Häfner in seinem Buch "Ein Warteschlangenansatz zur integrierten Produktionsplanung" sehr ausführlich und nachvollziehbar vor. Das Vorgehen ähnelt im Ansatz sehr stark jenem von Hopp/Spearman, jedoch macht Häfner den (sehr anschaulichen) Umweg über die Rüstzeiten. Zuerst wird die verfügbare Kapazität der Maschinen im Planungszeitraum ermittelt. Daraus resultiert in Verbindung mit dem Bedarf an den verschiedenen Produkten die produktive Auslastung u_0 (analog zu Gleichung (4.30)). Die Differenz zwischen produktiver und optimaler Auslastung steht somit den Rüstvorgängen zur Verfügung. Kennt man nun den Mittelwert der Rüstzeiten, so lässt sich die optimale Anzahl an Losen durch einfaches Dividieren ermitteln.[262]

$$Anzahl\ Lose = \frac{verfügbare\ Kapazität\ für\ Rüstvorgänge\ [Std]}{mittlere\ Rüstdauer\ [Std]} \qquad \textbf{(4.38)}$$

[261] Herleitung siehe Hopp/Spearman, 2001, S. 506 ff.
[262] Häfner, 1992, S. 176 ff.

In weiterer Folge ergibt sich die "optimale mittlere Fertigungszeit", also die in dieser Arbeit mit $t_{e,Los,m}$ bezeichnete Losbearbeitungsdauer minus der mittleren Rüstdauer, als der Quotient aus verfügbarer Fertigungskapazität und Losanzahl.

$$t_{e,Los,m}{}^{x} = \frac{verfügbare\ Fertigungskapazität\ [Std]}{Anzahl\ Lose} + mittlere\ Rüstdauer \qquad \textbf{(4.39)}$$

$t_{e,Los,m}{}^{x}$ *optimale mittlere Losbearbeitungszeit [Std]*

Nun bestimmt sich die Losgröße für jedes Produkt, indem man die Losbearbeitungszeit durch die Stückbearbeitungszeit des betreffenden Produkts an der betrachteten Arbeitsstation dividiert.

$$x^{x}{}_{i} = \frac{t_{e,Los,m}{}^{x} - t_{r,i}}{t_{e,i}} \qquad \textbf{(4.40)}$$

$x_i{}^{x}$ *optimale Losgröße für Produkt i [Stk]*
$t_{r,i}$ *Rüstzeit des Produktes i [Std]*
$t_{e,i}$ *Stückbearbeitungszeit des Produktes i [Std]*

Die sich ergebenden Losgrößen unterscheiden sich im Allgemeinen von Arbeitsstation zu Arbeitsstation, daher müssen die Lose, welche mehrere Maschinen durchlaufen, aufeinander abgestimmt werden. Häfner spricht in diesem Zusammenhang von "Harmonisierung" und formuliert die erforderlichen Schritte folgendermaßen:

"*Werden Produkte auf zwei oder mehr stark ausgelasteten Maschinen bearbeitet, müssen die verschiedenen Losgrößenvorschläge für jedes Produkt harmonisiert, d.h. aufeinander abgestimmt werden. Die harmonisierte Losgröße muss außerdem so an den Gesamtbedarf angepasst werden, dass dieser ein ganzzahliges Vielfaches der Losgröße beträgt*." [263]

Die Anpassung an den Bedarf ist nur bei einem definierten Planungshorizont notwendig, da sich so unnötige Lagerbestände vermeiden lassen. Bei Nichtvorhandensein eines solchen Horizontes (kontinuierliche, unbegrenzte Fertigung eines Produktes) kann ausgehend von der Ankunftsrate eine optimale Losgröße ermittelt werden, welche nach der Harmonisierung keiner weiteren Anpassung mehr bedarf. Außerdem werden folgende Kontrollen aufgrund der mehrfachen Anpassung der Losgrößen empfohlen:

"*Es ist zu überprüfen, ob der Mittelwert der Fertigungszeit ($t_{e,Los,i}$, Anm.) auf jeder der stark ausgelasteten Maschinen in der Nähe des zuvor bestimmten Optimums liegt. Ist dies nicht der Fall, sind die Losgrößen zu variieren. Außerdem ist der Variationskoeffizient ($c_{e,Los,m}$) für*

[263] Häfner, 1992, S. 177

jede Maschine zu bestimmen. Liegt dieser über 0,5, sollten die Losgrößen abgeändert werden." [264]

4.4.1.4 Heuristiken

Ein weiterer Weg, um in die Nähe von durchlaufzeitoptimalen Losgrößen zu gelangen, sind Heuristiken.[265] Dabei wird im Wesentlichen die Wartezeitfunktion minimiert (aufgrund der nichtkonvexen Form der Durchlaufzeitfunktion bei J > 2 Produkten eine notwendige, bei hoher Auslastung auch ausreichend genaue Vorgehensweise). An dieser Stelle soll vor allem die erste von Karmarkar[266] aufgestellte Heuristik dargestellt werden (da sie keine monetären Bewertung benötigt), mit der sich in isolierter Sicht für jedes Produkt eine approximativ optimale Losgröße ermitteln lässt:

$$x_i^x = \frac{2 * t_{r,i}}{t_{e,i} * (1 - u_0)} * \frac{1 + u_0}{2} \qquad \textbf{(4.41)}$$

4.4.1.5 weitere Verfahren zur Losgrößenoptimierung

Zur (hauptsächlich näherungsweisen) Losgrößenoptimierung existieren noch einige weitere Ansätze, wie beispielsweise das Gradientenverfahren[267,268] oder das Verfahren von Tempelmayer und Derstroff (MLCLSP)[269]. Ein weiteres, inzwischen relativ weit verbreitetes Verfahren stellt die durchlauforientierte Losgrößenbestimmung (DOLOS) dar, welche von Peter Nyhuis entwickelt wurde.[270,271] Diesen Methoden ist gemein, dass sie sowohl die "klassischen Kosten", also Lagerhaltungs- und Rüstkostensätze, berücksichtigen, parallel dazu aber auch die Kapitalbindung durch Nutzung der Kapazitäten und Wartezeiten bewerten. Sie führen in der praktischen Anwendung zu sehr brauchbaren "Kompromisslösungen", vor allem für mittelständische Betriebe.

Das wohl bekannteste und meistangewandte Verfahren stellt jedoch nach wie vor das klassische Verfahren nach Andler (bzw. Harris) dar, welches ausschließlich die entstehenden Kosten durch Lagerhaltung und Rüstvorgänge berücksichtigt, jedoch die Zeitaspekte außer Acht lässt.[272,273]

---

[264] Häfner, 1992, S. 177
[265] Missbauer, 1998, S. 344 ff.
[266] Karmarkar et al., 1992, S. 105 ff.
[267] Söhner, 1995
[268] Missbauer, 1998, S. 363 ff.
[269] Söhner, 1995, S. 195 ff.
[270] z.B. Nyhuis, 2008, S. 212 ff.
[271] vgl. z.B. Schönsleben, 2011, S. 550 ff.
[272] z.B. Recker, 2002, S. 106 ff.
[273] Schönsleben, 2011, S. 554 ff.

Jedoch soll hier auf diese Methoden nicht weiter eingegangen werden, da die Kostenoptimierung nicht Aufgabe dieser Arbeit ist und deren Rahmen sprengen würde. Außerdem führt eine kostenmäßige Bewertung der Zeitgrößen zwangsläufig zu Fehlern, sofern man keine genaue Kenntnis über die betriebsspezifischen Kostenstrukturen besitzt.[274] Deshalb soll im Rahmen dieser Arbeit nur mit zeitbezogenen Methoden gearbeitet werden, im praktischen Teil wird aus Aufwandsgründen hauptsächlich die Methode der optimalen Auslastung mit anschließender partieller Optimierung angewandt, ein Vergleich mit den Ergebnissen der Heuristik nach Karmarkar sowie der Methode von Häfner soll jedoch kurz beleuchtet werden.

4.5 Losfertigung in einer Produktionslinie

Nachdem man in den vorhergehenden Abschnitten Kenntnis über die Berechnung der Durchlaufzeit an einer Arbeitsstation erlangt hat, soll nun auf das Verhalten von Linienfertigungssystemen eingegangen werden. Die meisten Fertigungsprozesse bestehen schließlich nicht aus einem einzelnen Arbeitsvorgang, sondern aus vielen aufeinanderfolgenden, manchmal auch mehrfach durchlaufenen und verzweigten Arbeitsschritten. Dabei ist zwischen ein- und mehrstufiger Fertigung zu unterscheiden. Abbildung 48 zeigt eine mehrstufige Fertigung, wobei aber jedes Vor-, Zwischen- und Endprodukt nur an einer Arbeitsstation bearbeitet wird:

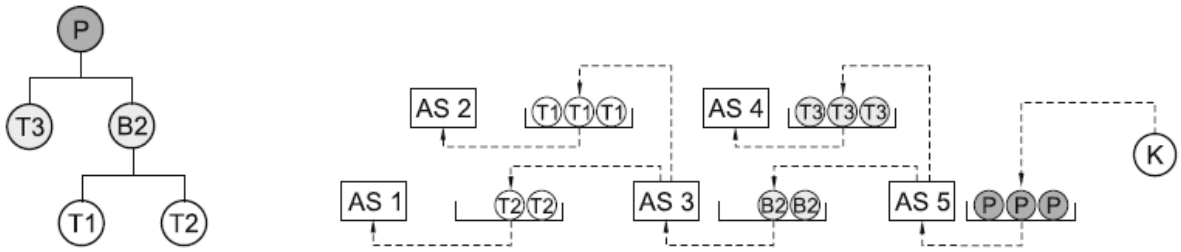


Abbildung 48: mehrstufige Linienfertigung[275]

Der Kunde verlangt also ein Endprodukt, welches zu einem Bedarf mehrerer Vor- und Zwischenprodukten führt. Diese werden sodann zunächst in einer Produktstruktur zusammengestellt (in der Abbildung a). Danach werden die für die Fertigstellung der Produkte erforderlichen Arbeitsstationen festgelegt und so der prinzipielle Produktionsverlauf geplant (b). Ausgehend vom Bedarf des Endproduktes kann für dieses eine Fertigungslosgröße festgelegt werden, die Losgrößen der vorangehenden Produktionsschritte werden danach auf diese abgestimmt.

[274] vgl. z.B. Nebl, 2007, S. 40 ff.
[275] Lödding, 2008, S. 138

4.5.1 Einstufige Fertigung

Unter einstufiger Fertigung wird im Allgemeinen verstanden, dass ein Produkt nur einen Arbeitsgang bis zu seiner Fertigstellung benötigt. Jedoch ist diese Definition nicht ausreichend. So fällt auch eine solche Konstellation unter diesen Begriff, wo das Produkt zwar eine Reihe von Arbeitsstationen durchläuft, jedoch keine Montagevorgänge auftreten, also keine Vorprodukte zu einem Endprodukt vereint werden. Recker fasst dies folgendermaßen zusammen: "*Einstufige Produktion liegt vor, wenn die Fertigung eines Produktes in einem geschlossenen, durchgängigen Prozess mit produktindividuellen Arbeitsgängen stattfindet; eine Losbildung erfolgt lediglich hinsichtlich der Endprodukte.*"[276] Kistner bezeichnet die einstufige Fertigung auch als "Veredelungsfertigung", diese kann folgendermaßen dargestellt werden, wobei EP das gewünschte Endprodukt und d die Nachfrage bzw. den Bedarf an diesem Produkt darstellt:

Abbildung 49: einstufige Fertigungsstruktur[277]

***Anmerkung**: Im praktischen Teil dieser Arbeit sollen nur Fälle einstufiger Fertigung behandelt werden, da bereits diese in Bezug auf die Problemstellung sehr aufschlussreich sind. Eine Behandlung mehrstufiger Fertigungsprozesse wäre sehr interessant, allerdings würde diese den Rahmen dieser Arbeit sprengen.*

4.5.2 Mehrstufige Fertigung

Die mehrstufige Fertigung (siehe Abbildung 50) von vielen verschiedenen Produkttypen stellt den allgemeinen Planungsfall dar. Es werden auf verschiedenen Fertigungsstufen Vor- und Zwischenprodukte hergestellt, welche schlussendlich zu einem Endprodukt zusammengefügt werden. Die Losgrößenplanung erfolgt im Prinzip analog zur einstufigen Fertigung, jedoch ist anschließend an die Losbildung für die einzelnen Stufen eine Stufenverknüpfung in Form einer stufenübergreifenden Harmonisierung der Losgrößen vorzunehmen.[278] Wieder wird die Definition von Recker herangezogen: "*Bei einer mehrstufigen Fertigung wird über Vor- und Zwischenprodukte schließlich das Endprodukt erstellt. Der gesamte Fertigungsprozess gliedert sich in Teilprozesse, für die jeweils - in gegenseitiger Abstimmung - eine eigene Losbildung erfolgt.*"[279] Es muss also zuerst auf jeder Stufe und für jedes Vor -, Zwischen - und

[276] Recker, 2002, S. 12
[277] Quelle: eigene Darstellung nach Kistner, 1990, S. 184
[278] Häfner, 1992, S. 185 ff.
[279] Recker, 2002, S. 12

Endprodukt die Losbildung gemäß Abschnitt 0 vorgenommen werden. Danach werden die Stufen aufeinander abgestimmt und so die endgültigen Fertigungslose bestimmt.

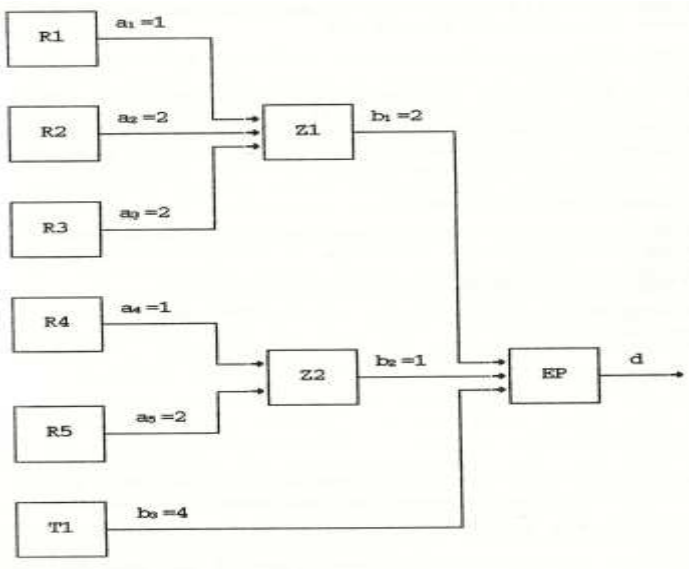


Abbildung 50: mehrstufige Fertigungsstruktur[280]

Bei vielen Produkten und vielen Produktionsstufen wird diese Vorgangsweise allerdings sehr aufwändig, daher geht man vereinfachend im Allgemeinen so vor, dass man nur die Losgrößen der Endprodukte wie oben beschrieben plant, die entsprechenden Losgrößen der Vorprodukte ausrechnet und diese dann auf Mittelwert und Streuung überprüft. Sind diese innerhalb der Toleranz, kann die Planung erfolgen, ansonsten werden die Losgrößen der Endprodukte variiert und das Prozedere wiederholt.[281] Abbildung 51 zeigt in einer Übersicht die prinzipielle Vorgehensweise.

Eine weitere Einschränkung der Analyse mehrstufiger Prozesse besteht darin, dass das Losgrößenproblem zumeist nur innerhalb einzelner Fertigungseinheiten betrachtet wird und die Annahme gilt, dass die Losgröße eines Auftrags innerhalb der Fertigungseinheit nicht geändert wird (keine arbeitsgangspezifischen Lose innerhalb der Fertigungseinheit). Die Zerlegung des Losgrößenproblems in einer mehrstufigen Fertigung in eine Serie einstufiger Probleme ist eine Heuristik, wenn auch eine, die in heutigen PPS-Systemen weitgehend angewendet wird. Wie schwer diese Einschränkung wiegt, hängt dabei vom Einzelfall ab.[282] Laut Missbauer kann man auch für den Fall, dass mehr als eine Fertigungseinheit durchlaufen wird (z. B. Rohteilefertigung und Teilefertigung), "*in vielen Fällen davon ausgehen, dass die Analyse einstufiger Systeme zu sinnvollen Resultaten führt. So lässt sich nachweisen, dass unter realistischen Prämissen die im Modellrahmen optimale Losgröße*

[280] Quelle: Kistner, 1990, S. 185
[281] Häfner, 1992, S. 189
[282] Missbauer, 1998, S. 305 ff.

etwa in der Teilefertigung nahezu unabhängig sein kann von der Losgröße der vorhergehenden Fertigungsstufe (z. B. Rohteilefertigung), womit ein einstufiges Modell auch im mehrstufigen Fall ausreichend sein kann."[283]

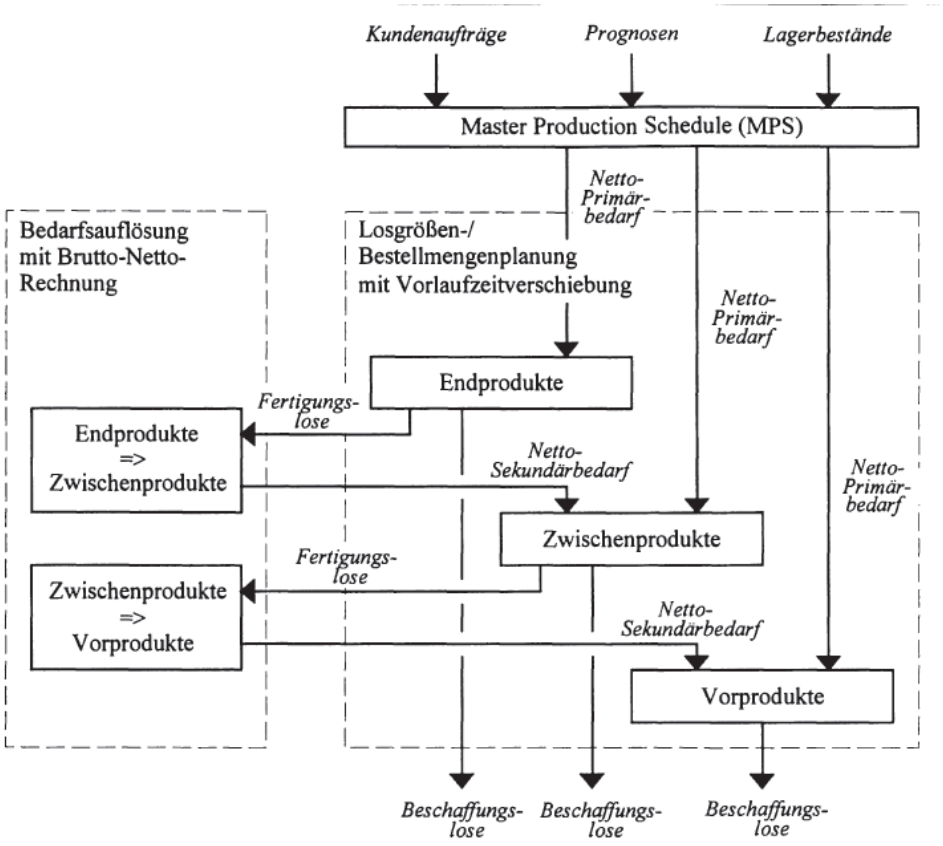


Abbildung 51:mehrstufige Losplanung[284]

Betreffend der gegenständlichen Untersuchung kann somit nach Identifizierung des Engpasses auf der Endproduktstufe die (durchlaufzeitoptimale) Losgrößenentscheidung an dieser Arbeitsstation getroffen werden. Die Losgrößen der Vor- und Zwischenprodukte ergeben sich analog den obigen Erläuterungen. Sodann können diese Losgrößen zur Ermittlung der weiteren Kennzahlen (z.B. Durchlaufzeit oder Bestand) in der Ablaufplanung verwendet werden.

4.5.3 Überlappung von Arbeitsvorgängen

In den Abschnitten 2.2.8 und 2.3.4 wurde die Auftragsdurchlaufzeit über mehrere Arbeitsvorgänge hinweg einfach als die Summe der einzelnen Stationsdurchlaufzeiten definiert. Dies trifft allerdings nur auf Fertigungsabläufe zu, welche nach dem "nonsplit" - Prinzip ablaufen, d.h. wenn Transport - und Fertigungslose (Prozesslose) gleich groß sind und sich während des gesamten Auftragsdurchlaufs nicht ändern. In vielen realen

[283] Missbauer, 1998, S. 311
[284] Recker, 2002, S. 22

Werkstattsystemen trifft dies allerdings nicht zu, sondern sind die Transportlose wesentlich kleiner als die Fertigungslose (Extrembeispiel ist der One-Piece-Flow). Dadurch wird eine Überlappung der Arbeitsvorgänge ermöglicht. Abbildung 52 zeigt die Durchlaufzeit eines Auftrages für den Fall einer geschlossenen Produktion, Abbildung 53 zeigt die sich ergebende Durchlaufzeitreduktion durch Aufteilung des durchlaufenden Auftrages in 3 Teillose, also des Übergangs zu einer offenen Produktion:

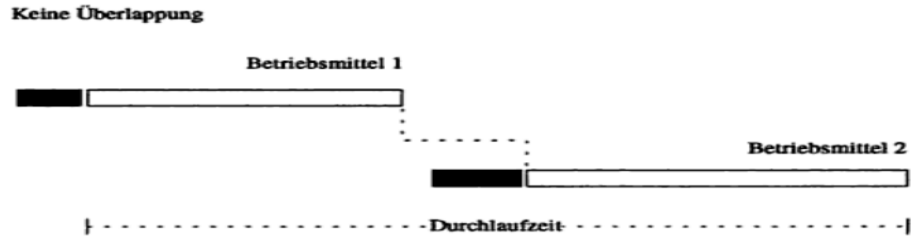


Abbildung 52: Gesamtdurchlaufzeit ohne Überlappung[285]

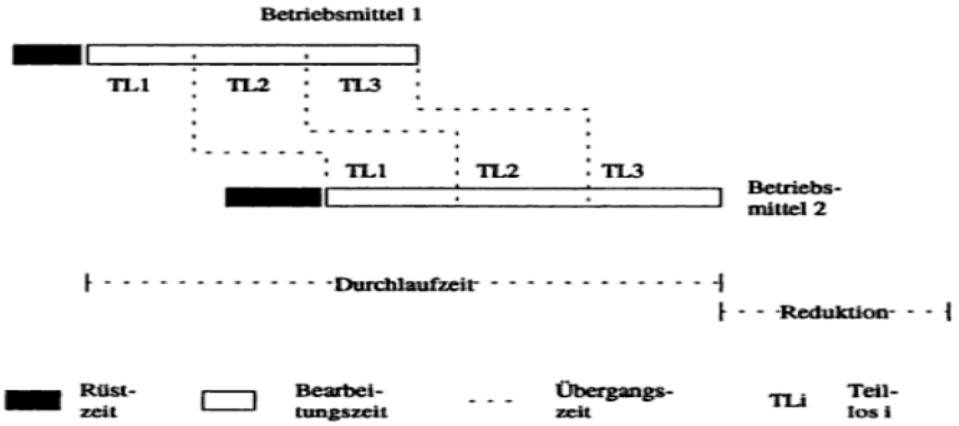


Abbildung 53: Gesamtdurchlaufzeit mit Überlappung[286]

Der Effekt der Überlappung sowie die allgemeine Berechnung der damit erreichten Gesamtdurchlaufzeit soll anhand des folgenden Beispiels erläutert werden: Es wird ein zweistufiger Fertigungsprozess mit der Prozesslosgröße x, den Prozess- und Rüstzeiten $t_e(1)$ und $t_r(1)$ bzw. $t_e(2)$ und $t_r(2)$ sowie der Transportlosgröße $x_{TR} = x/m$ betrachtet. Wird ein Los mit der Größe x ($= m * x_{TR}$) an Station 1 bearbeitet, so werden nach Fertigstellung von x_{TR} Einheiten diese sofort an Station 2 weitertransportiert, womit Station 2 bereits mit der Bearbeitung des Loses beginnen kann, während Station 1 noch mit der Abarbeitung des restlichen Loses beschäftigt ist. Zur mathematischen Formulierung betrachtet man den Durchlauf der Teillose (= Transportlose) durch die Stationen. Nachdem in diesem Beispiel für alle Prozesse der Anschaulichkeit wegen Variabilitätsfreiheit ($c_a = c_e = 0$) angenommen wird (deterministische Prozesse) und für die Auslastung $u < 1$ gelten muss, treten keine Wartezeiten auf, das heißt, ZW = 0. Allerdings kommt es sehr wohl zu einer Wartezeit im

[285] Quelle: Kurbel, 2005, S. 150
[286] Quelle: Kurbel, 2005, S. 150

(Teil-) Los an Station 1 gemäß Gleichung (4.11) sowie an Station 2. Für die Durchlaufzeit des ersten Teilloses an Station 1 ergibt sich:

$$ZDL_{TL1}(1) = t_r(1) + (x_{TR} - 1) * t_e(1) + t_e(1) \quad \textbf{(4.42)}$$

$ZDL_{TL1}\ (1)$	$Durchlaufzeit\ des\ ersten\ Teilloses\ an\ Station\ 1\ [Std]$
$t_r\ (1)$	$Rüstzeit\ an\ Station\ 1\ [Std]$
x_{TR}	$Transportlosgröße\ [Stk]$
$t_e\ (1)$	$Stückbearbeitungszeit\ an\ Station\ 1\ [Std]$

In der obigen Gleichung stellt der erste Term die Rüstzeit dar. Der Term (x_{TR} - 1)* t_e(1) stellt die Wartezeit eines Werkstücks im jeweiligen Teillos dar, der letzte Term t_e (1) schließlich beschreibt die Durchlaufzeit dieses Werkstücks. Damit ergibt sich die mittlere Durchlaufzeit an Station 1 für den Fall von m Teillosen gemäß folgender Gleichung:

$$ZDL_m(1) = \frac{1}{m}[m * t_r(1) + (1 + 2 + \ldots + m) * x_{TR} * t_e(1)] \quad \textbf{(4.43)}$$

$ZDL_m\ (1)$	$mittlere\ Durchlaufzeit\ an\ Station\ 1\ [Std]$
m	$Anzahl\ der\ Teillose\ (Transportlose)\ [-]$

Diese Gleichung lässt sich durch Mittelwertbildung und Kürzung vereinfachen zu:

$$ZDL_m(1) = t_r(1) + \frac{m+1}{2} * x_{TR} * t_e(1) \quad \textbf{(4.44)}$$

Anmerkung: *Werden die Werkstücke einzeln an der ersten Station angeliefert, so wird der Zeitterm ZWL in Gleichung* (4.42) *durch die Losbildungszeit ZWLB gemäß Gleichung (4.18) ersetzt. Auch ein Fall mit beiden Anteilen ist denkbar, und zwar dann, wenn an den verschiedenen Arbeitsstationen unterschiedliche Teillose gebildet werden. Ein solcher Fall soll jedoch in dieser Arbeit nicht behandelt werden, da er deren Rahmen sprengen würde.*

Wird der Extremfall eines One-Piece-Flows zwischen Station 1 und 2 angenommen, also x_{TR} = 1 definiert (-> keine losbedingten Wartezeiten nach Station 1 bzw. vor Station 2), so vereinfacht sich Gleichung (4.46) zu (vgl. Formel (4.12)):

$$ZDL(1) = t_r(1) + \frac{x+1}{2} * t_e(1) \quad \textbf{(4.45)}$$

$ZDL(1)$	$Durchlaufzeit\ an\ Arbeitsstation\ 1\ [Std]$
$t_r\ (1)$	$Rüstzeit\ an\ Arbeitsstation\ 1\ [Std]$
x	$Fertigungslosgröße\ [Stk]$
$t_e\ (1)$	$Stückbearbeitungszeit\ [Std]$

Die Berechnung der Durchlaufzeit an der zweiten Station erfordert nun allerdings eine etwas genauere Betrachtung. Im Folgenden soll dies für den allgemeinen Fall von m Teillosen Schritt für Schritt erfolgen:

Das erste Transportlos der Größe x_{TR} kommt an der Station 2 an und wird dort nach einer Bearbeitungszeit von $t_r(2) + x_{TR} * t_e(2)$ fertiggestellt. Das zweite Transportlos wird zum Zeitpunkt $t_r(2) + 2 * x_{TR} * t_e(2)$ fertiggestellt, ist aber um $x_{TR} * t_e(1)$ später als das erste Transportlos angekommen, daher berechnet sich seine Bearbeitungszeit zu $t_r(2) + 2 * x_{TR} * t_e(2) - x_{TR} * t_e(1)$. In solcher Art werden alle Teillose abgearbeitet, bis das letzte Transportlos an Station 2 zum Zeitpunkt $t_r(2) + m * x_{TR} * t_e(2)$ fertiggestellt ist. Dieses Teillos kam $(m - 1) * x_{TR} * t_e(1)$ später an als das erste, seine Bearbeitungszeit an Station 2 ergibt sich also zu $t_r(2) + m * x_{TR} * t_e(2) - (m - 1) * x_{TR} * t_e(1)$.[287]

Damit lässt sich für die mittlere Durchlaufzeit an der Arbeitsstation 2 angeben:

$$ZDL_m\,(2) = \frac{1}{m} * [(m * t_r(2) + (1 + 2 + \ldots + m) * x_{TR} * t_e(2) - (0 + 1 + \ldots + m - 1) * x_{TR} * t_e(1)] \qquad \textbf{(4.46)}$$

$ZDL_m\,(2)$	*Durchlaufzeit des Auftrages an Arbeitsstation 2 [Std]*
m	*Anzahl der Transportlose (Teillose)[-]*
x_{TR}	*Transportlosgröße [Stk]*
$tr\,(2)$	*Rüstzeit an Arbeitsstation 2 [Std]*
$te\,(2)$	*Stückbearbeitungszeit an Arbeitsstation 2 [Std]*

Diese Gleichung lässt sich erneut durch Mittelwertbildung und Kürzung zu folgender Form vereinfachen:

$$ZDL_m\,(2) = t_r(2) + \frac{m + 1}{2} * x_{TR} * t_e(2) - \frac{m - 1}{2} * x_{TR} * t_e(1) \qquad \textbf{(4.47)}$$

Der Term $(m - 1)/2 * x_{TR} * t_e\,(1)$ stellt in der obigen Gleichung den Überlappungszeitanteil dar.

Anmerkung: *Diese Beziehung ist nur genau dann exakt, wenn die Teillose unmittelbar nacheinander an Station 2 ankommen. Treten hier Wartezeiten auf, weil Station 2 bspw. mit der Bearbeitung von Teillos 3 schon fertig ist, jedoch die Bearbeitung von Teillos 4 an Station 1 noch nicht abgeschlossen ist, so müssen diese "Leerzeiten" in der Berechnung berücksichtigt werden. Dieser Schritt erfordert allerdings noch weitere Untersuchungen, welche in dieser Arbeit nicht mehr vorgenommen wurden.*

[287] vgl. dazu Hopp/Spearman, 2001, S. 317 ff.

Für x_{TR} = 1 und m = x (also den Fall des One - Piece - Flows) folgt für die mittlere Durchlaufzeit an Station 2:

$$ZDL\,(2) = t_r(2) + \frac{x+1}{2} * t_e(2) - \frac{x-1}{2} * t_e(1) \qquad \textbf{(4.48)}$$

Dadurch ergibt sich eine wesentlich kürzere Auftragsdurchlaufzeit, als die Summierung der Einzeldurchlaufzeiten an den beiden Stationen ergeben würde. Die Durchlaufzeit des Loses durch beide Stationen ermittelt sich zu[288]:

$$\begin{aligned} ZDL_m\,(Linie) &= ZDL_m(1) + ZDL_m(2) \\ &= t_r(1) + t_r(2) + t_e(1) + \frac{x+1}{2} * t_e(2) \end{aligned} \qquad \textbf{(4.49)}$$

$ZDL_m\,(Linie)$ *mittlere Durchlaufzeit durch die 2- Stationen- Linie [Std]*

Analog gilt für den allgemeinen Fall (mit m Teillosen):

$$ZDL_m\,(Linie) = t_r(1) + t_r(2) + t_e(1) + \frac{m+1}{2} * x_{TR} * t_e(2) \qquad \textbf{(4.50)}$$

Für jede weitere Station in der Produktionslinie wird die Durchlaufzeit analog zu (4.46) ermittelt. Für eine einstufige Fertigung an drei Arbeitsstationen mit x_{TR}=1 und x=6 ist der Überlappungseffekt in folgender Grafik dargestellt:

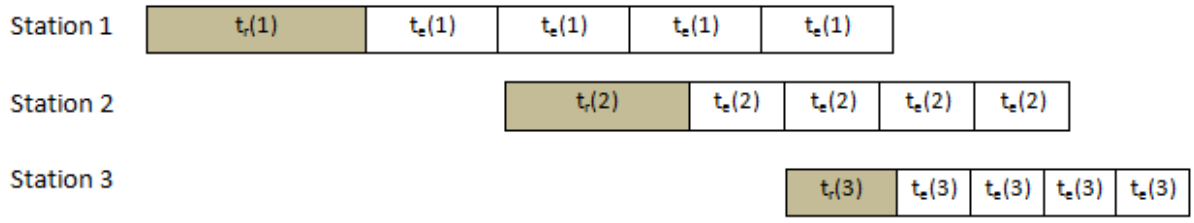


Abbildung 54: Überlappungseffekt[289]

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang noch, dass der Überlappungseffekt sich umso stärker auf die Auftragsdurchlaufzeit auswirkt, je mehr "langsame" Arbeitsstationen bzw. Engpässe sich weit "upstream" in der Produktionslinie befinden.[290] Außerdem sind bei

[288] Hopp/Spearman, 2001, S. 318
[289] Quelle: eigene Darstellung nach Hopp/Spearman, 2001, S. 319
[290] Hopp/Spearman, 2001, S. 319

niedrig ausgelasteten Maschinen eher kleine Transportlosgrößen zu wählen, da sonst die Losbildungszeit ZWLB bzw. die Loswartezeit ZWL an diesen Maschinen sehr groß wird.[291]

Generell ist jedoch noch darauf hinzuweisen, dass eine Überlappung von Arbeitsvorgängen zu einem erheblich höheren dispositiven und administrativen Aufwand führt. Die Abstimmung der Arbeitsstationen aufeinander muss in diesem Fall wesentlich genauer erfolgen, damit sich der Mehraufwand durch eine entsprechende Ersparnis bei der Durchlaufzeit lohnt.[292] Auf weitere Ausführungen zum Effekt überlappender Fertigungen wird hier verzichtet, es wird dazu auf die Literatur und dabei insbesondere auf die Arbeit von Steinrücke[293] verwiesen.

4.6 Zusammenfassung der Theorie aus Kapitel 4

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den vorangegangenen Ausführungen sollen hier kurz zusammengefasst werden. "*Die Losgrößen beeinflussen mehrere zentrale Kriterien der Produktionsplanung, wie z.B. die Variabilität der Bearbeitungszeiten, die Auslastung (durch Rüsten) und somit die Werkstattbestände und die Durchlaufzeiten. Sie determinieren folglich zu einem großen Teil die Leistungsfähigkeit eines Fertigungssystems.*"[294]

"Im Hinblick auf die Anwendung innerhalb der Produktionsplanung ist bemerkenswert, dass die Losgrößen die Auslastung sowie die Variationskoeffizienten der Zwischenankunfts- und Bedienungszeiten [...] beeinflussen. Die mittleren Wartezeiten hängen deshalb in einer recht komplexen Weise von den Losgrößen ab."[295]

Die Losgröße beeinflusst also im Wesentlichen

- den Ankunftsprozess (mittlere Zwischenankunftszeiten und Varianz)
- den Bedienprozess (Mittelwert und Varianz)
- die Rüstzeit (durch Anzahl der Lose)
- die Auslastung (durch die ersten drei Punkte)

Diese Aussagen gelten sowohl für den Einprodukt - wie auch für den Mehrproduktfall. Allerdings ist bei der Berechnung darauf zu achten, dass sich unterschiedliche Aufträge sowohl durch ihre auftragsspezifischen Eigenschaften (Mittelwert und Streuung von Ankunfts- und Bearbeitungsprozess) auf die Durchlaufzeit auswirken, jedoch auch durch ihre Präsenz im Auftragsmix wesentlichen Einfluss auf das Durchlaufverhalten ausüben. Daher ist eine Gewichtung der unterschiedlichen Aufträge gemäß Abschnitt 4.4 erforderlich. Um eine

[291] Hopp/Spearman, 2001, S. 314
[292] Kurbel, 2005, S. 149
[293] Steinrücke, 2007, S. 263 ff.
[294] Söhner, 1995, S. 61
[295] Söhner, 1995, S. 77

sinnhafte und aussagekräftige Modellierung der Zusammenhänge zu ermöglichen, ist es bei Fällen mit J = 3 oder mehr Produkten außerdem notwendig, zuerst mittels einer (oder mehreren) Methode(n) in den Bereich von "effizienten" Lösungen zu gelangen, von denen aus die Losgrößen wiederum variiert werden und so die Auswirkungen dieser Variation dargestellt werden können. Eine solche Vorgehensweise wird in Beispiel 2 des praktischen Teils vorgestellt. So kommt Missbauer zu dem Schluss: "*Die zentrale bereichsübergreifende Planung muss mit stabilen Operationscharakteristika der Fertigungseinheiten rechnen können. Die Losgrößen bestimmen wesentlich die Operationscharakteristika der Fertigungseinheiten. Deshalb müssen vorweg (als Koordinierungsnorm) gewisse Annahmen über die Losgrößen getroffen werden, die aggregierte Größen wie etwa Mittelwert und Varianz der Bedienungszeiten sowie Rüstzeitanteil festlegen. Solange diese Konventionen eingehalten werden, können die Losgrößen der einzelnen Produkte in gewissem Ausmaß geändert werden, ohne dass dies schwerwiegende Folgen auf die Operationscharakteristika der Fertigungseinheiten hat*."[296]

Außerdem: "*Der Zusammenhang zwischen Losgrößen und Durchlaufzeit wird von zwei gegenläufigen Tendenzen bestimmt:*

- *Je kleiner die Losgrößen, desto höher ist - aufgrund der steigenden Rüstzeiten - die Kapazitätsauslastung des Systems. Es existiert daher eine Untergrenze für die Losgröße, nämlich jene, bei der die Auslastung 100 % beträgt. Beim MIMI1-System (wie auch beim G|G|1 Modell, Anm.) wächst die mittlere Durchlaufzeit bei gegen 100 % gehender Auslastung ins Unendliche, so dass bei jenen Losgrößen, die eine Auslastung knapp an die 100 % - Marke ergeben, bei abnehmender Losgröße mit einem drastischen Anstieg der mittleren Durchlaufzeit zu rechnen ist.*
- *Werden sehr große Lose produziert, so sind die Rüstzeiten vernachlässigbar gering, und die Auslastung des Arbeitssystems wird sich bei geringfügiger Änderung der Losgrößen (fast) nicht verändern. Der Arbeitsinhalt eines Auftrages ist damit annähernd proportional zur Losgröße.*"[297]

Schlussendlich bleibt festzustellen, dass bei vernachlässigbar kleinen Rüstzeiten auf eine Verringerung der Losgröße im Rahmen der Betriebsauftragsplanung Wert gelegt werden sollte. Von dieser Maßnahme ist eine Reduktion der Durchlaufzeit und der Bestände zu erwarten. Die Variationskoeffizienten von Durchlauf- und Zwischenabgangszeit werden dadurch nicht bzw. nur geringfügig beeinflusst.[298] Mit den Gleichungen aus dem Abschnitt 0 kann nun bei gegebener Auslastung durch Fertigung *(produktive Auslastung, Anm.)* die optimale mittlere Losgröße bestimmt werden. In empirischen Untersuchungen konnte

[296] Missbauer, 1998, S. 188
[297] Missbauer, 1998, S. 314
[298] Häfner, 1992, S. 130

festgestellt werden, dass bei weniger als fünf zu bearbeitenden Produkten die Durchlaufzeit bei einer Losgröße minimiert wird, die kleiner ist als die durch die erwähnten Gleichungen bestimmte. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei wenigen Produkten die Wahrscheinlichkeit recht hoch ist, dass zwei aufeinanderfolgende Auftrage dem gleichen bzw. einem ähnlichen Produkt zuzuordnen sind (Rüstverwandtschaften). Oft kann in solchen Fällen der Rüstvorgang unterbleiben und die Losgröße kleiner gewählt werden.

Für die Betriebsauftragsplanung ergibt sich die Empfehlung, auf Maschinen mit hoher Auslastung eher größere Lose und auf Maschinen mit niedriger Auslastung eher kleinere Lose zu wählen, wenn man die Durchlaufzeit minimieren möchte.[299] Abbildung 55 zeigt eine Kurve, welche sich als der effiziente Rand der möglichen Losgrößen bei unterschiedlichen Auslastungsgraden interpretieren lässt (Beispieldaten). So zeigt sich in diesem Fall, dass bei einer produktiven Auslastung von u_0 = 70 % eine Losgröße von 102 Stück zu einer minimalen Durchlaufzeit führt, sich bei höheren Auslastungen jedoch überproportional größere durchlaufzeitminimale Losgrößen einstellen (bei u_0 = 80 % sind es 171 Stück, bei 90 % wären es bereits ca. 300 Stück.).

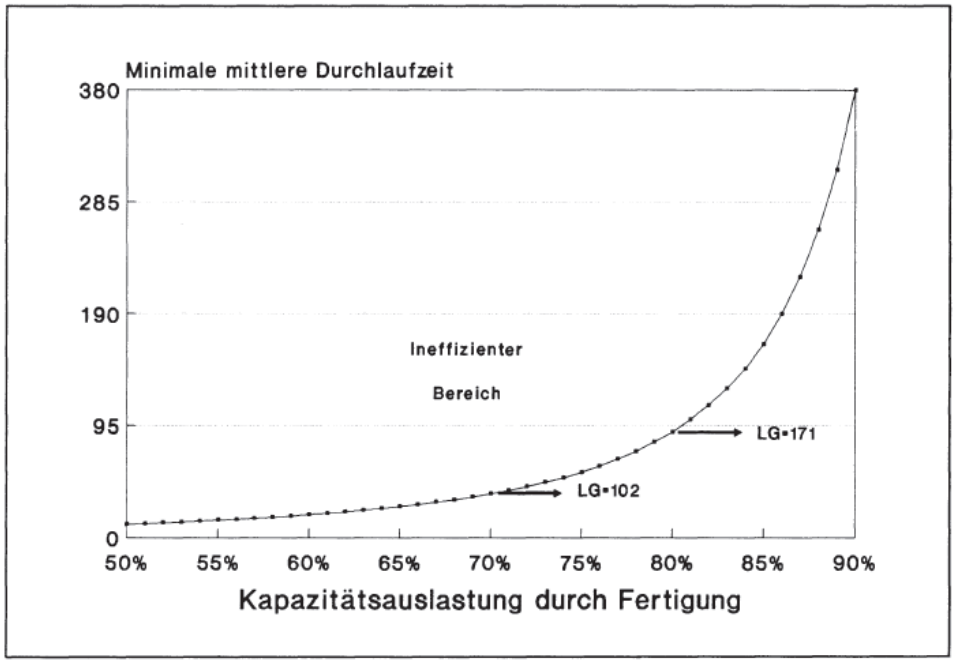


Abbildung 55:opt. Losgrößen bei unterschiedlicher Auslastung[300]

Dieser Umstand erscheint sofort logisch, da schließlich bei einer sehr hohen produktiven Auslastung u_0 nur sehr wenig Zeit (bzw. Kapazität) für Rüstvorgänge (u^x - u_0) übrig bleibt. Demnach müssen in solchen Fällen möglichst große Lose gewählt werden. Bei niedriger

[299] Häfner, 1992, S. 136
[300] Quelle: Häfner, 1992, S. 136

Auslastung jedoch führt eine Losgrößenverringerung zu kürzeren Bearbeitungszeiten und damit zu kürzeren Durchlaufzeiten, da es zu keinen Wartezeiten vor der Station kommt.

In Kapitel 4 wurden weiters organisationsbedingte Phänomene betrachtet. Diese sind in der Berechnung und Modellierung mit einzubeziehen und sind im Wesentlichen abhängig von

- dem Transportverhalten zur Arbeitsstation bzw. von der Arbeitsstation (ZWL, ZWLB)
- Überlappungseffekten (Teillose, Lossplittung)
- der Arbeitsweise der Arbeitsstation (z.B. Parallel- Losfertigung)

5 Praktischer Teil - Simulation

In diesem Kapitel soll nun die praktische Anwendung des Theorieteils erfolgen. Die ermittelten Zusammenhänge sollen auf diese Weise überprüft und validiert werden.

5.1 Ablauf einer Simulationsstudie

"Ein **Experiment** ist die gezielte empirische Untersuchung des Verhaltens eines Modells durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parametervariation."[301]

Bei einer stochastischen Simulationsstudie werden zu jedem Parametersatz mehrere Simulationsläufe durchgeführt. Diese Läufe führen zu Beobachtungen der Ergebniswerte (Stichprobe), die in der Regel mit den berechneten Werten verglichen und gegebenenfalls durch Konfidenzintervalle einer statistischen Analyse unterzogen werden.[302] Der letzte Schritt entfällt in dieser Arbeit, da die Simulation nur zur generellen Überprüfung der rechnerischen Ergebnisse herangezogen werden soll.

Um vernünftige Ergebnisse mittels der Simulation zu erhalten, muss das Fertigungssystem zuerst auf folgende **allgemeine Eigenschaften** untersucht werden:

1. Handelt es sich um ein Ein-Stationen oder Mehr-Stationen System (Produktionslinie)?
2. Bei Mehr- Stationen System: Welche Maschine stellt den Engpass dar? => r_b => Durchsatz
3. Wie hoch ist die Tageskapazität der einzelnen Maschinen? => TKAP
4. Wie verläuft der Materialstrom mengenmäßig (Input an der ersten Station sowie evtl. Verzweigungen)
5. Treten Überlappungen in der Auftragsbearbeitung auf?

Danach geht man auf die **Berechnung der Parameter** an den einzelnen Stationen ein:

1. Welche "natürliche" Prozesszeit (beobachtete mittlere Bearbeitungszeit für **eine** Einheit) besitzt die Station? => t_0
2. Wie sieht die Verteilung der beobachteten Prozesszeiten aus? => σ_0 => c_0
3. Welche Verfügbarkeit und welches Wartungsverhalten weist die Station auf? => MTTR, MTTF
4. Welche effektive Prozesszeit besitzt der Arbeitsvorgang? => t_e, c_e
5. Wie lässt sich der Ankunftsprozess beschreiben? => t_a, c_a
6. Welche Rüstzeiten treten auf? => t_r

[301] VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1, 1993
[302] Schmidt, 2014, S. 92

Im dritten Schritt werden die **Loseffekte** an den einzelnen Stationen berücksichtigt. Dabei stellen sich folgende Fragen:

1. In welcher Prozesslosgröße wird gefertigt? => x => $t_{e,Los}$
2. Liegt Parallellosfertigung vor? => $r_{a,Los}$
3. Wie sieht der Transport zwischen den Stationen aus? => x_{TR}, ZTR
4. Welche losbedingten Wartezeiten treten auf? => ZWL, ZWLB

Schlussendlich können die elementaren Kennzahlen des Systems angeschrieben werden:

1. Wartezeit ZW
2. Durchlaufzeit ZDL
3. (Umlauf-) Bestand
4. Leistung der Arbeitsstation bzw. der Produktionslinie

In den folgenden Beispielen werden unterschiedliche Aspekte der Losfertigung untersucht, daher werden nicht alle diese Punkte in jedem Beispiel berücksichtigt werden. Allerdings sollte in einer realen Fertigungsumgebung nach diesem Schema einheitlich vorgegangen werden.

5.2 Grundlagen des verwendeten Simulationsmodells

An dieser Stelle sollen die wichtigsten Eigenschaften der zur Validierung der rechnerischen Ergebnisse verwendeten Simulationssoftware "Plant Simulation" von technomatrix erläutert werden. Hierbei handelt es sich um ein zu der Klasse der ereignisdiskreten Simulationsmodelle zählendes Programm, was bedeutet, dass sich Modellzustände (im Gegensatz zu kontinuierlichen Simulationsmodellen) nur zu bestimmten Zeitpunkten ändern. Dabei ist sind nur die Änderungen der Systemeigenschaften zu diesen Zeitpunkten für den Simulationsfortgang wesentlich, was dazwischen geschieht, ist irrelevant. Dadurch eignen sich solch ereignisdiskreten Modelle sehr gut für die Abbildung produktionslogistischer Abläufe.[303]

Die wesentlichen in dieser Arbeit verwendeten Bausteine zur Erstellung der Simulationsmodelle werden in Folge aufgelistet und kurz beschrieben, für weitere Erläuterungen dazu sei auf die Literatur, insbesondere auf die Arbeiten von Eley[304] und Bangsow[305] verwiesen.

- **Objekte** sind Elemente, welche sich während eines Simulationslaufs ändern und vor allem auch ihren Standort ändern können. Sie bilden in ihrer Gesamtheit den

[303] Eley, 2012, S. 8
[304] Eley, 2012
[305] Bangsow, 2010

Materialfluss durch das betrachtete System. Plant Simulation verwendet dafür den Namen "BE", also bewegliches Element. Darunter fallen einzelne Werkstücke wie auch Transporteinheiten wie Paletten oder Fahrzeuge.

- **Ressourcen** sind unbewegliche Elemente im Modell, welche von den BE´s für eine gewisse Zeit in Anspruch genommen werden. Darunter fallen Bearbeitungsstationen, an welchen sich Rüst- und Bearbeitungszeiten sowie z.B. Verfügbarkeiten mittels unterschiedlicher Verteilungsformen einstellen lassen, wie auch Montagestationen oder Warteräume.
- **Methoden** stellen Steuerungsinstrumente dar, mit welchen in den Prozessablauf eingegriffen werden kann und mittels derer eine Verbindung von bspw. Arbeitsplänen und Stationen hergestellt werden kann. In der vorliegenden Arbeit wurden Methoden hauptsächlich im Mehrproduktfall zur richtigen Zuordnung von Bearbeitungszeiten der entsprechenden BE´s sowie zur Steuerung des Materialflusses verwendet. Die Programmiersprache hierfür ist SimTalk, die Befehle werden am Ein- oder Ausgang von Ressourcen aufgerufen.
- **Arbeitspläne und Lieferlisten** werden erstellt, um die Auftrags- und Ablaufstrukturen übersichtlich zu gestalten. Alle relevanten Eingangsdaten werden hier definiert und in weiterer Folge von den Ressourcen mittels Methoden abgefragt.
- **Quellen und Senken** stellen die Grenze des betrachteten Systems dar. Hier werden die BE´s (in den Beispielen die Lose und Paletten) erzeugt bzw. vernichtet, an ihnen wird auch die Durchlaufzeit gemessen.
- **Attribute** werden benutzt, um die BE´s oder Ressourcen mittels Methoden zu identifizieren und ansprechen zu können.
- Der **Ereignisverwalter** verwaltet die auftretenden Ereignisse in einer Zeitleiste. Hier wird der Planungszeitraum eingestellt, in welchem die Simulation stattfinden soll.
- **Diagramme** dienen der Visualisierung von statistischen Ergebnissen bzw. des zeitlichen Verlaufs interessierender Kenngrößen.

Abbildung 95 im Anhang zeigt eine Übersicht über die verwendeten Bausteine anhand eines Simulationslaufs aus Beispiel 2.

5.3 Beispiel 1: einzelner Arbeitsplatz, gleichartige Aufträge

Als Eingangsbeispiel soll eine einfache 1x1 Produktion betrachtet werden, in welcher Lose gleichartiger Produkte an einer Arbeitsstation bearbeitet werden. Damit sollen grundsätzliche Einblicke in das Verhalten des Durchlaufzeitverlaufs bei einer Fertigung in Losen gewonnen werden.

5.3.1 Rahmenbedingungen, Szenario

Betrachtet wird eine Arbeitsstation, welche aus einer einzelnen Fräsmaschine besteht. Diese Maschine läuft im Zweischichtbetrieb (TKAP=16 Std/BKT). In dem betrachteten Zeitraum wurde eine mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen von 2 Tagen (= 32 Betriebsstunden) beobachtet, die Reparatur dauerte im Schnitt 3 Stunden. Weiters werden jedes Monat Wartungsarbeiten durchgeführt, welche jeweils eine ganze Schicht dauern (8 Stunden). Die Maschine wird mit Paletten beliefert, welche jeweils ein Los (= einen Auftrag), bestehend aus x Teilen, beinhalten. Es wird im Mittel 1 Palette pro Schicht an die Station geliefert ($t_{a,Los}$ = 8 Std.). Nach der Bearbeitung eines jeden Loses muss die Maschine 1 Stunde lang auf die nächste Losfamilie (den nächsten Auftrag) umgerüstet werden. Es kann nur immer ein Teil auf einmal gefräst werden. Nach der Bearbeitung werden die bearbeiteten Einheiten auf Paletten in derselben Losgröße weitertransportiert (geschlossene Fertigung). Unter diesen Rahmenbedingungen soll nun die Losgröße (also die Anzahl der auf den Paletten befindlichen Frästeile) variiert werden.

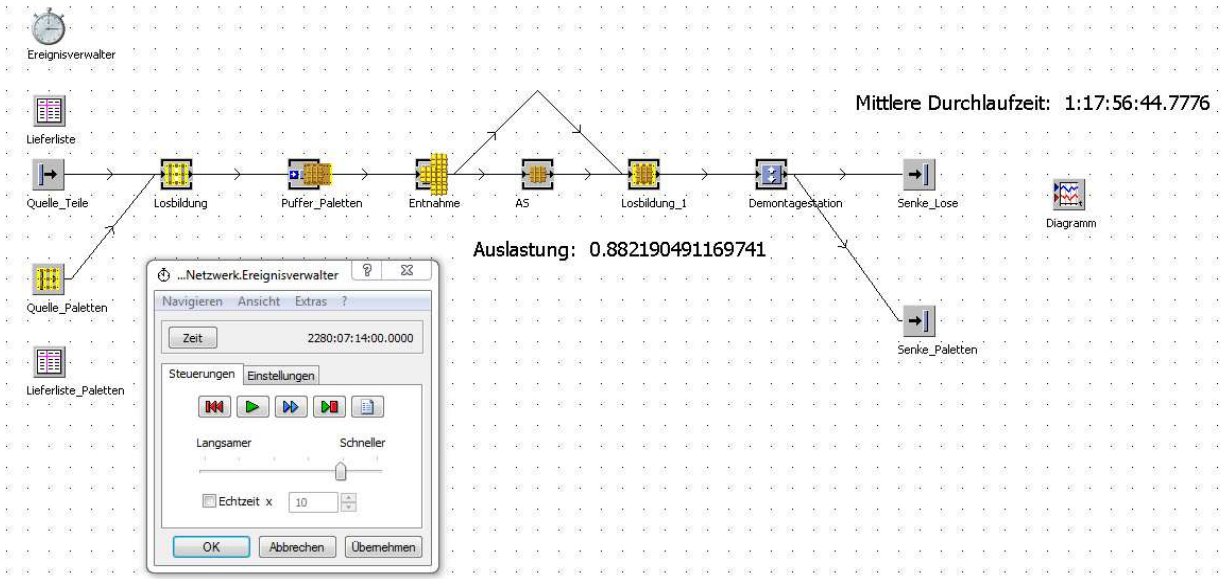


Abbildung 56:Beispiel 1 in Plant Simulation

Das Modell wurde in der Software Plant Simulation von technomatrix nachgebaut. In der obigen Abbildung ist ein Simulationslauf im entsprechenden Modell abgebildet. Der Einfachheit halber werden sowohl im Rechengang als auch in der Simulation die Transport- sowie die Entlade- und Beladezeiten vernachlässigt (Diese Zeiten sind aber im Allgemeinen meist nicht vernachlässigbar, jedoch würde ihre Berücksichtigung den Rahmen der Arbeit sprengen).

In den folgenden Abschnitten werden zunächst gewisse Abstraktionen vorgenommen, die Zeitgrößen gemäß den entsprechenden Abschnitten aus dem theoretischen Teil ermittelt und die errechneten Daten mit jenen der Simulationsläufe verglichen. Dabei wird zuerst der

Fall deterministischer Bearbeitungs- und Ankunftszeiten behandelt (Taktung), danach der einfachste Fall der Warteschlangentheorie, also exponentialverteilte Ankunfts- sowie Bedienzeiten. Schließlich soll der "reale" Fall behandelt werden, in welchem zunächst ausgehend von Stichproben die Berechnung der wesentlichen Parameter erfolgt und danach mittels der Gleichungen für den allgemeinen Fall (G|G|1 Modell) die Zeitgrößen errechnet werden (Die Berechnung mitsamt Formeln erfolgt nur einmalig für diesen Fall). Auch hier werden die mittels Simulationsläufen ermittelten Daten aufgelistet und die Ergebnisse kurz diskutiert. Die folgende Tabelle verschafft einen Überblick über diese Vorgehensweise:

	D|D|1	M|M|1	G|G|1
$t_{a,Los}$ konstant	Abschnitt 5.3.2.1	Abschnitt 5.3.3.1	Abschnitt 5.3.4.4
t_a konstant	Abschnitt 5.3.2.2	Abschnitt 5.3.3.2	Abschnitt 5.3.4.5

Tabelle 1: Aufbau Beispiel 1

5.3.2 Abstraktion 1: deterministische Prozesse (D|D|1 Modell)

In diesem Abschnitt soll der Fall eines getakteten Fließprozesses behandelt werden, es wird also sowohl im Ankunfts- wie auch im Bearbeitungsprozess Varianzfreiheit unterstellt ($c_e = c_a = 0$). Obwohl solch eine Konstellation in einem Werkstattbetrieb mit Handarbeitsplätzen so gut wie nie auftritt, lassen sich doch einige prinzipielle Zusammenhänge anhand dieses Szenarios erklären.

Anmerkung: *In den folgenden Ausführungen wurde bereits vorgreifend als Wert der Bearbeitungszeit eines Frästeils der errechnete Mittelwert aus Abschnitt 5.3.4 verwendet.*

5.3.2.1 konstante Zwischenankunftszeiten

Zuerst wird der Fall konstanter Zwischenankunftszeiten von exakt 8 Stunden zwischen zwei ankommenden Paletten, unabhängig von der Größe des Inhalts, betrachtet. Die folgenden Tabellen zeigen die Eingangsparameter sowie die rechnerischen wie auch die Simulationsergebnisse.

Parameter						
x [Stk]	t_r [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	$c_{e,Los}$	$t_{a,Los}$ [Std]	$c_{a,Los}$	u [1]
6	1	3,32	0,00	8,00	0,00	0,415
7	1	3,71	0,00	8,00	0,00	0,463
8	1	4,09	0,00	8,00	0,00	0,512
9	1	4,48	0,00	8,00	0,00	0,560
10	1	4,87	0,00	8,00	0,00	0,608
11	1	5,25	0,00	8,00	0,00	0,657
12	1	5,64	0,00	8,00	0,00	0,705
13	1	6,03	0,00	8,00	0,00	0,753
14	1	6,41	0,00	8,00	0,00	0,802
15	1	6,80	0,00	8,00	0,00	0,850
16	1	7,19	0,00	8,00	0,00	0,898
17	1	7,57	0,00	8,00	0,00	0,947
18	1	7,96	0,00	8,00	0,00	0,995
19	1	8,35	0,00	8,00	0,00	1,043
20	1	8,73	0,00	8,00	0,00	1,092

Tabelle 2:Eingangsdaten für $t_{a,Los}$=konst, $c_{a,Los}$= c_e =0

berechnete Kennzahlen						Simulationswerte		
ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$WL_{nonsplit}$ [Std]	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$ZDL_{nonsplit}$ [Std]	DLZm, split	DLZm, nonsp	u
0,00	0,97	1,93		2,35	3,32	2,35	3,3	0,415
0,00	1,16	2,32		2,55	3,71			
0,00	1,35	2,71		2,74	4,09	2,74	4,09	0,512
0,00	1,55	3,09		2,93	4,48			
0,00	1,74	3,48		3,13	4,87	3,11	4,867	0,61
0,00	1,93	3,87		3,32	5,25			
0,00	2,13	4,25		3,51	5,64	3,50	5,6	0,7
0,00	2,32	4,64		3,71	6,03			
0,00	2,51	5,03		3,90	6,41	3,9	6,4	0,8
0,00	2,71	5,41		4,09	6,80			
0,00	2,90	5,80		4,29	7,19	4,3	7,18	0,898
0,00	3,09	6,19		4,48	7,57			
0,00	3,29	6,57		4,67	7,96	4,66	7,96	0,995
0,00	3,48	6,96		4,87	8,35			
0,00	3,67	7,35		5,06	8,73	34,88	38,43	0,9998

Tabelle 3: ermittelte Zeitgrößen für $t_{a,Los}$=konst, $c_{a,Los}$= c_e =0

In Tabelle 3 sind links die mithilfe der im Theorieteil erläuterten Formeln errechneten Werte und rechts die mittels Simulationsläufen ermittelten Durchlaufzeiten aufgelistet. Dabei wurde (und wird in allen kommenden Szenarien) der Fall eines geschlossenen Transports vor UND nach der Station (nonsplit - Fall) sowie der Fall einer Weitergabe einzelner Werkstücken nach ihrer Bearbeitung (split - Fall) betrachtet. Es ergibt sich zwischen den simulierten und errechneten Ergebnissen eine sehr gute Übereinstimmung, was durch die Voraussetzungen (c_e=c_a=0) auch nicht weiter verwunderlich ist. Zu erkennen ist allerdings, dass sich die Ergebnisse von Simulation und Berechnung im Bereich der Vollauslastung (rot hinterlegt) stark unterscheiden. Die simulierten Werte spiegeln dabei eher die tatsächlichen Verhältnisse wieder, da laut Abschnitt 3.7.1 die Warteschlange vor der Arbeitsstation bei Vollauslastung und darüber stark anwächst. Die folgende Abbildung verdeutlicht diesen Umstand:

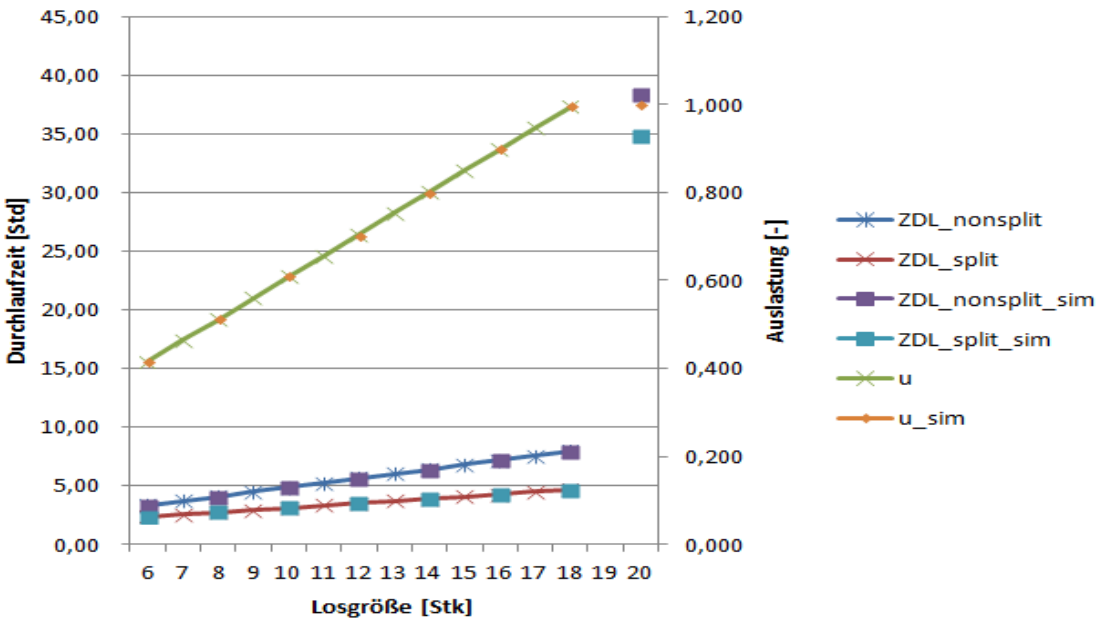


Abbildung 57: Ergebnisse für getakteten Prozess, t_{a_Los}= konst

Solange u < 1 gilt, kommt es - wie erwartet - zu keiner Wartezeit der Paletten vor der Station (ZW=0, jede Palette gelangt unbehindert zur Arbeitsstation), die Wartezeit im Los (ZWL) und mit ihr die Durchlaufzeit steigt linear mit der Losgröße an. Sobald u den Wert 1 erreicht bzw. überschreitet, bildet sich ein sehr stark zunehmender Stau an Paletten vor der Station, wie auch folgendes Bild aus der Simulation zeigt:

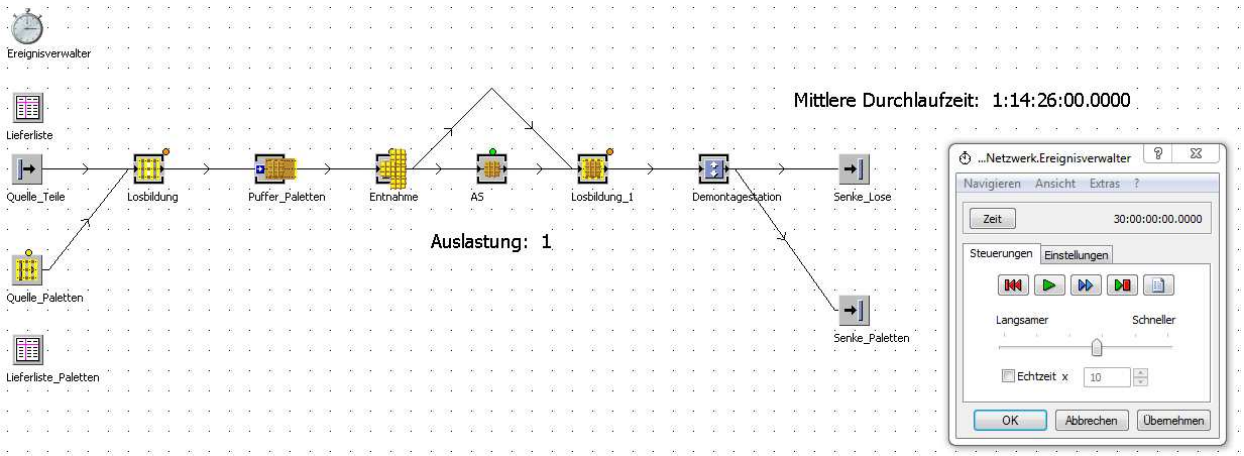


Abbildung 58: t_{a_Los}=konst, LG=20

5.3.2.2 losgrößenabhängige Zwischenankunftszeiten

Nun wird das Ankunftsverhalten an der Station lediglich dahingehend verändert, dass sich der Abstand der angelieferten Paletten der Menge der pro Palette angelieferten Einheiten (Losgröße) anpasst. Dies geschieht in solcher Weise, dass die Ankunftsrate r_a der *Einzelteile* konstant bleibt. Dieses Verhalten ist natürlich realitätsnaher als der erste Fall, da es nach kurzer Überlegung sinnvoll erscheint, Paletten mit 8 Frästeilen in größeren Abständen an die Maschine zu liefern als Paletten mit nur 4 Einheiten (gleichartige Teile vorausgesetzt). Es

wird eine Ankunftsrate der Teile von 2 Stück pro Stunde angenommen. Also kommen bspw. Lose zu je 10 Einheiten im Abstand von 5 Stunden an, Lose zu je 12 Einheiten in Abständen von 6 Stunden. Tabelle 4 zeigt die Eingangsdaten für einen Losgrößenbereich von 6-27 Stück pro Los, Tabelle 5 die sich damit ergebenden Zeitgrößen.

Parameter								
x [Stk]	t_r [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	$c_{e,Los}$	t_a [Std]	c_a	$t_{a,Los}$ [Std]	$c_{a,Los}$	u [1]
6	1	3,32	0,00	0,5	1	3	0,00	1,11
7	1	3,71	0,00	0,5	1	3,5	0,00	1,06
8	1	4,09	0,00	0,5	1	4	0,00	1,02
9	1	4,48	0,00	0,5	1	4,5	0,00	1,00
10	1	4,87	0,00	0,5	1	5	0,00	0,97
11	1	5,25	0,00	0,5	1	5,5	0,00	0,96
12	1	5,64	0,00	0,5	1	6	0,00	0,94
13	1	6,03	0,00	0,5	1	6,5	0,00	0,93
14	1	6,41	0,00	0,5	1	7	0,00	0,92
15	1	6,80	0,00	0,5	1	7,5	0,00	0,91
16	1	7,19	0,00	0,5	1	8	0,00	0,90
17	1	7,57	0,00	0,5	1	8,5	0,00	0,89
18	1	7,96	0,00	0,5	1	9	0,00	0,88
19	1	8,35	0,00	0,5	1	9,5	0,00	0,88
20	1	8,73	0,00	0,5	1	10	0,00	0,87
21	1	9,12	0,00	0,5	1	10,5	0,00	0,87
22	1	9,51	0,00	0,5	1	11	0,00	0,86
23	1	9,89	0,00	0,5	1	11,5	0,00	0,86
24	1	10,28	0,00	0,5	1	12	0,00	0,86
25	1	10,67	0,00	0,5	1	12,5	0,00	0,85
26	1	11,05	0,00	0,5	1	13	0,00	0,85
27	1	11,44	0,00	0,5	1	13,5	0,00	0,85

Tabelle 4: Eingangsdaten t_a=konst, $c_{a,Los}$= c_e =0

In Tabelle 4 fällt auf, dass der Überlastbereich (also u>1) nun im Gegensatz zum vorigen Abschnitt bei den kleinen Losgrößen auftritt. Dies lässt sich durch den steigenden relativen Rüstanteil bei steigender Anzahl an Losen erklären.

berechnete Kennzahlen						Simulationswerte		
ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$ZWL_{nonsplit}$ [Std	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$ZDL_{nonsplit}$ [Std]	DLZm, split	DLZm, nonsp	u
0,00	0,97	1,93		2,35	3,32	32,82	37,72	0,9999
0,00	1,16	2,32		2,55	3,71			
0,00	1,35	2,71		2,74	4,09	10,90	12,2	0,9998
0,00	1,55	3,09		2,93	4,48			
0,00	1,74	3,48		3,13	4,87	3,12	4,867	0,973
0,00	1,93	3,87		3,32	5,25			
0,00	2,13	4,25		3,51	5,64	3,50	5,63	0,94
0,00	2,32	4,64		3,71	6,03			
0,00	2,51	5,03		3,90	6,41	3,90	6,4	0,917
0,00	2,71	5,41		4,09	6,80			
0,00	2,90	5,80		4,29	7,19	4,20	7,18	0,898
0,00	3,09	6,19		4,48	7,57			
0,00	3,29	6,57		4,67	7,96	4,60	7,95	0,884
0,00	3,48	6,96		4,87	8,35			
0,00	3,67	7,35		5,06	8,73	5,05	8,75	0,87
0,00	3,87	7,73		5,25	9,12			
0,00	4,06	8,12		5,45	9,51	5,42	9,5	0,865
0,00	4,25	8,51		5,64	9,89			
0,00	4,45	8,89		5,83	10,28	5,80	10,28	0,857
0,00	4,64	9,28		6,03	10,67			
0,00	4,83	9,67		6,22	11,05	6,20	11,05	0,85
0,00	5,03	10,05		6,41	11,44			

Tabelle 5: Zeitgrößen t_a=konst, $c_{a,Los}$= c_e =0

In Tabelle 5 kann man die Konsequenzen der Variation der Losgröße ablesen. Auffallend ist bereits an dieser Stelle, dass sich die beiden Durchlaufzeitwerte für den split- und nonsplit-Fall nun wesentlich stärker als noch im vorigen Abschnitt unterscheiden. Dies lässt sich durch die veränderten Ankunftsraten der Lose erklären. Abbildung 59 fasst die Ergebnisse grafisch zusammen:

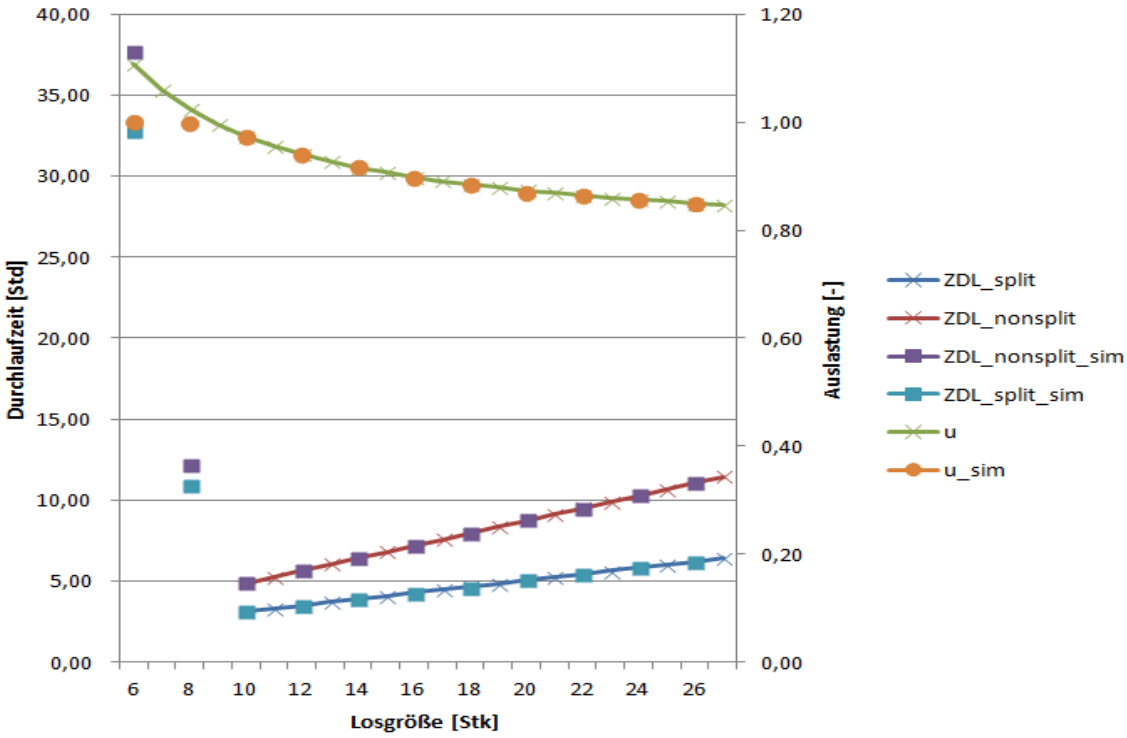


Abbildung 59: Ergebnisse für getakteten Prozess, ta=konst

Bei u < 1 ergibt sich wieder ein linearer Anstieg der Durchlaufzeit mit der Losgröße. Bei einer Losgröße von 9 oder kleiner führt jedoch die Berechnung zu keinen vernünftigen Ergebnissen, die Simulation zeigt in diesem Bereich sehr stark ansteigende Zeiten (u > 1). Interessant ist auch, dass sich die Auslastung in einem weit kleineren Bereich als im vorigen Abschnitt bewegt und auch keinen linearen Verlauf mehr aufweist, was aus dem zunehmenden Anteil der Rüstzeit relativ zur reinen Bearbeitungszeit bei gleichbleibender Ankunftsrate der Einzelteile resultiert. Insgesamt kann festgestellt werden, dass zwischen den simulierten und berechneten Durchlaufzeit- und Auslastungswerten eine sehr gute Übereinstimmung (im Bereich u < 1) erzielt wird.

5.3.3 Abstraktion 2: Poissonprozesse (M|M|1 Modell)

In diesem Abschnitt sollen nun varianzbehaftete Bedien- und Ankunftszeiten betrachtet werden. Dabei wird für beide Prozesse ein Variationskoeffizient von 1 angenommen, was, wie bereits in Abschnitt 3.7.3 erwähnt wurde, das allgemeine Modell auf den Spezialfall M|M|1 reduziert. Dieser wird sehr häufig bei Materialflussuntersuchungen verwendet.

Obwohl er keine genauen bzw. "realitätsnahen" Ergebnisse liefert, zeigt er doch auf einfache Art und Weise den Einfluss von Variabilität auf die Durchlaufzeitgrößen auf.

5.3.3.1 konstante Zwischenankunftszeiten

Wieder soll zuerst der Fall einer gleichbleibenden Ankunftsrate der Paletten unabhängig von ihrem Inhalt angenommen werden. In den folgenden Tabellen kann man die Ergebnisse ablesen.

Parameter								
x [Stk]	t_r [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	$c_{e,Los}$	t_a [Std]	c_a	$t_{a,Los}$ [Std]	$c_{a,Los}$	u [1]
6	1	3,32	0,41			8	1	0,41
7	1	3,71	0,38			8	1	0,46
8	1	4,09	0,35			8	1	0,51
9	1	4,48	0,33			8	1	0,56
10	1	4,87	0,32			8	1	0,61
11	1	5,25	0,30			8	1	0,66
12	1	5,64	0,29			8	1	0,70
13	1	6,03	0,28			8	1	0,75
14	1	6,41	0,27			8	1	0,80
15	1	6,80	0,26			8	1	0,85
16	1	7,19	0,25			8	1	0,90
17	1	7,57	0,24			8	1	0,95
18	1	7,96	0,24			8	1	0,99
19	1	8,35	0,23			8	1	1,04
20	1	8,73	0,22			8	1	1,09

Tabelle 6: Eingangsdaten M|M|1, $t_{a,Los}$=konst

In Tabelle 6 ist die Abnahme des Variationskoeffizienten der Losbearbeitungszeit gemäß Abschnitt 4.2.5 ersichtlich.

berechnete Kennzahlen						Simulationswerte		
ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$WL_{nonsplit}$ [Std]	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$ZDL_{nonsplit}$ [Std]	DLZm, split	DLZm, nonsp	u
1,37	0,97	1,93		3,73	4,69	3,5	4,45	0,454
1,83	1,16	2,32		4,38	5,54			
2,41	1,35	2,71		5,15	6,51	4,95	6,12	0,57
3,17	1,55	3,09		6,10	7,65			
4,16	1,74	3,48		7,28	9,02	6,25	7,77	0,58
5,48	1,93	3,87		8,80	10,73			
7,30	2,13	4,25		10,81	12,94	8,9	10,9	0,79
9,91	2,32	4,64		13,62	15,94			
13,89	2,51	5,03		17,78	20,30	12,18	14,75	0,86
20,55	2,71	5,41		24,64	27,35			
33,73	2,90	5,80		38,01	40,91	24,9	27,6	0,95
71,13	3,09	6,19		75,61	78,70			
831,47	3,29	6,57		836,15	839,43	49,45	52,3	0,97
-105,83	3,48	6,96		-100,97	-97,49			
-54,62	3,67	7,35		-49,56	-45,89	76,63	80,65	0,993

Tabelle 7: Zeitgrößen M|M|1, $t_{a,Los}$=konst

Anhand der Ergebnisse für die Durchlaufzeiten erkennt man, dass die Warteschlangentheorie nur vernünftige Ergebnisse für Auslastungen strikt kleiner 1 liefert.

Bei Vollauslastung und darüber hinaus berechnet sie aufgrund der Gleichungsform für die Wartezeit negative Ergebnisse.

Es zeigt sich - analog zu Abschnitt 5.3.2.1 - dass die Auslastung bei einer Losgröße von 19 den Wert 1 übersteigt, die Arbeitsstation also "überlastet" ist. Der Verlauf der Auslastung entspricht dabei genau jenem in Abbildung 57. Der Unterschied zu jener Abbildung besteht in der Nichtlinearität der Durchlaufzeitkurve. Diese steigt im Bereich kleiner Losgrößen zunächst beinahe linear an. Ab einer Losgröße von 15 bzw. einer Auslastung von 85% wird die Kurve der Durchlaufzeit immer steiler und steigt schließlich asymptotisch gegen Unendlich an, siehe dazu Abbildung 60:

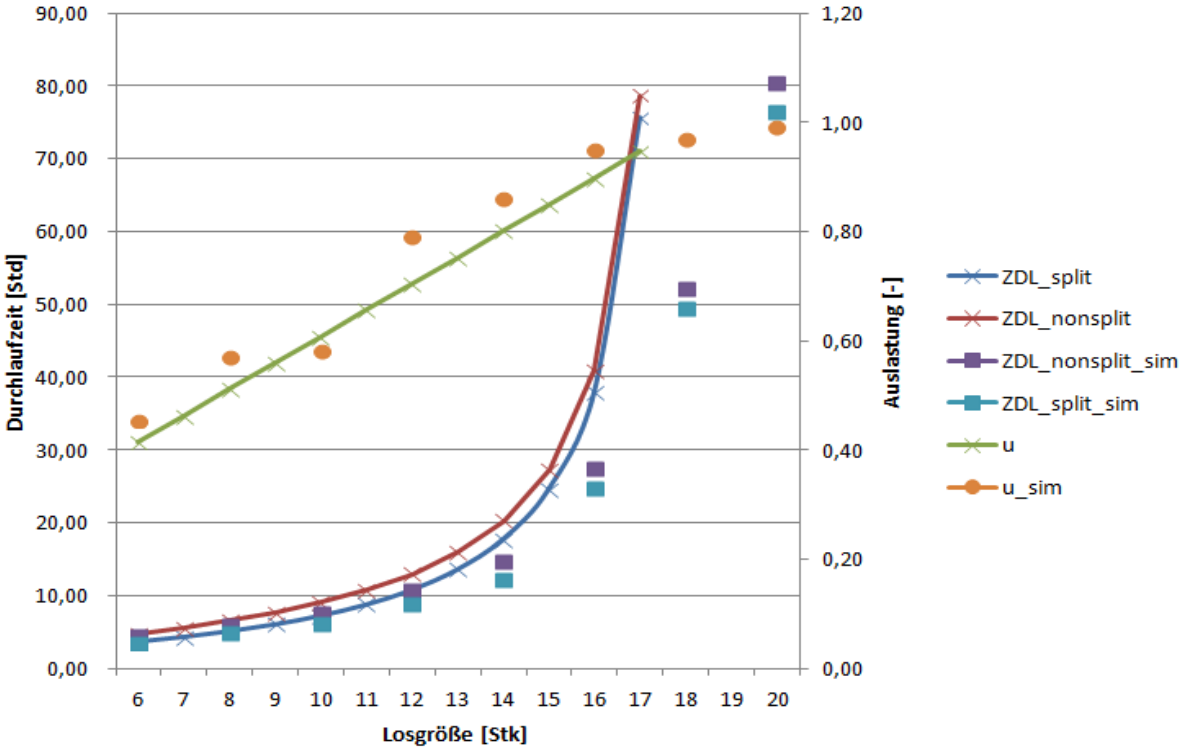


Abbildung 60: Ergebnisse für M|M|1, t_{a_Los}=konst

Dieser Effekt kommt durch die nun auftretende Wartezeit der Paletten vor der Station zustande. Durch die stochastischen Ankunfts- und Bedienzeiten kommt es bereits bei sehr niedriger Auslastung zu unregelmäßigen Beständen vor der Arbeitsstation. Dieser Anteil (ZW) wirkt sich dabei zunächst nur sehr geringfügig aus, stellt jedoch bei größer werdenden Losgrößen (und damit steigender Auslastung) einen immer wichtiger werdenden Anteil an der Gesamtdurchlaufzeit dar.

Anzumerken ist hierbei noch, dass sich die Simulationsergebnisse mit den errechneten vor allem im hoch ausgelasteten Bereich nicht mehr vollständig decken. Die Simulation zeigt hier einen weitaus moderateren Anstieg der Durchlaufzeit (Zur Behandlung dieses Problems siehe Abschnitt 5.3.3.2).

5.3.3.2 Zwischenankunftszeiten abhängig von Losgröße

Nun kommen die Lose wieder in Abständen abhängig von ihrer Größe an der Arbeitsstation an (vgl. Abschnitt 5.3.2.2). Die Eingangsdaten sowie Ergebnisse lassen sich aus den folgenden Tabellen ablesen:

Parameter								
x [Stk]	t_r [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	$c_{e,Los}$	t_a [Std]	c_a	$t_{a,Los}$ [Std]	$c_{a,Los}$	u [1]
6	1	3,32	0,41	0,5	1	3	1,00	1,11
7	1	3,71	0,38	0,5	1	3,5	1,00	1,06
8	1	4,09	0,35	0,5	1	4	1,00	1,02
9	1	4,48	0,33	0,5	1	4,5	1,00	1,00
10	1	4,87	0,32	0,5	1	5	1,00	0,97
11	1	5,25	0,30	0,5	1	5,5	1,00	0,96
12	1	5,64	0,29	0,5	1	6	1,00	0,94
13	1	6,03	0,28	0,5	1	6,5	1,00	0,93
14	1	6,41	0,27	0,5	1	7	1,00	0,92
15	1	6,80	0,26	0,5	1	7,5	1,00	0,91
16	1	7,19	0,25	0,5	1	8	1,00	0,90
17	1	7,57	0,24	0,5	1	8,5	1,00	0,89
18	1	7,96	0,24	0,5	1	9	1,00	0,88
19	1	8,35	0,23	0,5	1	9,5	1,00	0,88
20	1	8,73	0,22	0,5	1	10	1,00	0,87
21	1	9,12	0,22	0,5	1	10,5	1,00	0,87
22	1	9,51	0,21	0,5	1	11	1,00	0,86
23	1	9,89	0,21	0,5	1	11,5	1,00	0,86
24	1	10,28	0,20	0,5	1	12	1,00	0,86
25	1	10,67	0,20	0,5	1	12,5	1,00	0,85
26	1	11,05	0,20	0,5	1	13	1,00	0,85
27	1	11,44	0,19	0,5	1	13,5	1,00	0,85

Tabelle 8: Eingangsdaten M|M|1, t_a=konst

berechnete Kennzahlen						Simulationswerte		
ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$ZWL_{nonsplit}$ [Std	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$ZDL_{nonsplit}$ [Std]	DLZ_{split}	$DLZ_{nonsplit}$	$u_{nonsplit}$
-20,10	0,97	1,93		-17,74	-16,78	75,80	76,72	0,996
-38,00	1,16	2,32		-35,46	-34,30			
-101,08	1,35	2,71		-98,34	-96,99	59,90	60,95	0,993
554,48	1,55	3,09		557,41	558,96			
97,61	1,74	3,48		100,73	102,47	44,30	46	0,99
60,99	1,93	3,87		64,31	66,24			
47,84	2,13	4,25		51,35	53,48	30,95	34,9	0,98
41,30	2,32	4,64		45,01	47,33			
37,55	2,51	5,03		41,45	43,96	26,67	29,1	0,98
35,22	2,71	5,41		39,31	42,02			
33,73	2,90	5,80		38,01	40,91	25,40	28	0,97
32,76	3,09	6,19		37,24	40,33			
32,15	3,29	6,57		36,82	40,11	24,85	28,1	0,967
31,78	3,48	6,96		36,65	40,13			
31,60	3,67	7,35		36,66	40,34	25,30	29	0,957
31,56	3,87	7,73		36,82	40,68			
31,63	4,06	8,12		37,07	41,13	25,45	29,2	0,949
31,78	4,25	8,51		37,42	41,67			
31,99	4,45	8,89		37,83	42,27	25,10	28,6	0,94
32,26	4,64	9,28		38,29	42,93			
32,58	4,83	9,67		38,80	43,63	22,10	26,78	0,91
32,93	5,03	10,05		39,35	44,37			

Tabelle 9: Zeitgrößen ta=konst, c=1

Die Auslastung nimmt hier wieder dieselben Werte wie in Tabelle 4 an (da sie nur von den Mittelwerten von Ankunfts- und Bedienrate abhängt), jedoch unterscheiden sich die Werte der Durchlaufzeit wesentlich. Abbildung 61 fasst die errechneten und simulierten Ergebnisse wieder in grafischer Form zusammen:

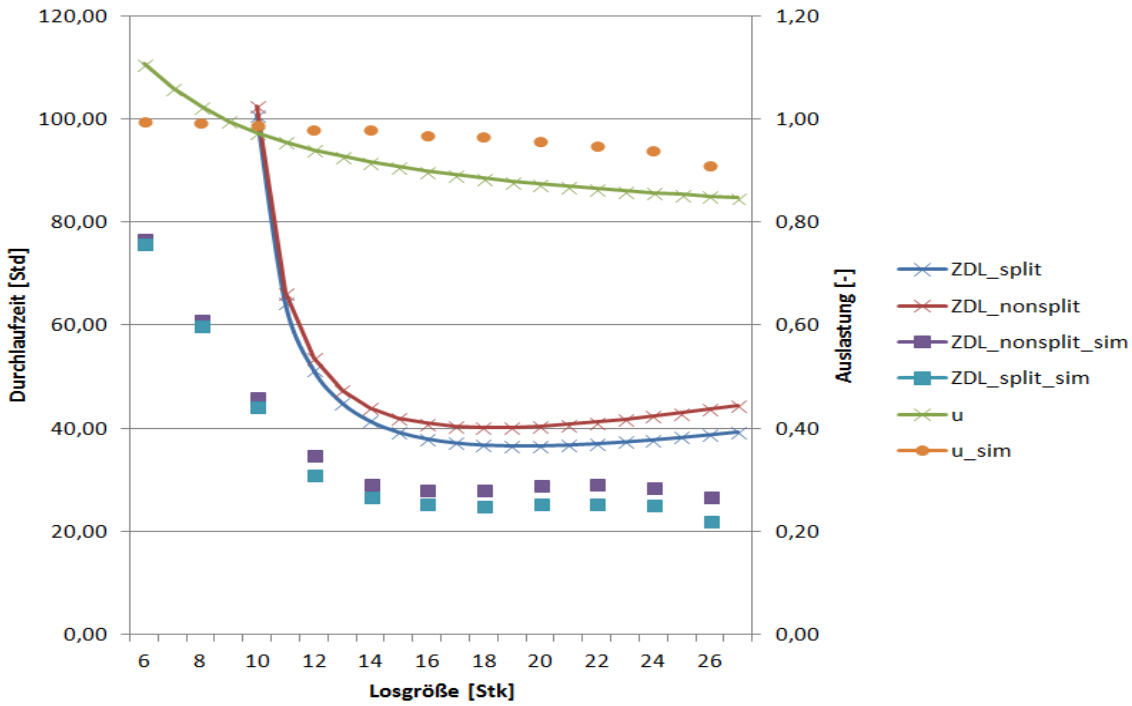


Abbildung 61:Ergebnisse für M|M|1, ta=konst

Wieder lässt sich der Einfluss der Wartezeit (ZW) mit ihrer konvexen Form auf den Verlauf der Durchlaufzeit beobachten (analog zu Abbildung 60). Nähert sich die Auslastung 100%, so nimmt der "Stau" von Paletten vor der Station sehr stark zu. Die Kurve der Auslastung verläuft analog jener aus Abbildung 59, da wieder bei kleinen Losgrößen der relative Anteil der Rüstzeit und damit die Auslastung stark zunimmt. Bei hohen Losgrößen steigt die Durchlaufzeit wieder annähernd linear mit der Losgröße an (da dann der Term ZWL sowie die Bearbeitungszeit dominiert).

Sehr auffallend ist hier, dass sich der Verlauf der simulierten Ergebnisse von jenem der errechneten Daten erheblich unterscheidet. So wird der Eindruck erweckt, die Gleichungen der Warteschlangentheorie "überschätzen" den Einfluss der Variabilität auf die Wartezeit. Jedenfalls wurden mit der Simulation bei allen Losgrößen kleinere Durchlaufzeiten erzielt, vor allem im hoch ausgelasteten Bereich verlaufen die Simulationspunkte wesentlich flacher. Auch die Verläufe der Auslastung decken sich im Gegensatz zu den vorherigen Abschnitten nicht mehr. Interessant ist außerdem noch der rechte Bereich der Grafik, wo die simulierten Daten einen erneuten Abfall der Durchlaufzeit bei Losgrößen > 22 suggerieren. Daher wurden hier noch weitere Simulationsläufe mit Losgröße 28, 30 und 32 durchgeführt. Die

Ergebnisse waren von Simulationslauf zu Simulationslauf sehr unterschiedlich, außerdem zeigten sie weiterhin nicht den erwarteten ungefähr linearen Verlauf.

Wie sich herausstellte, waren im gewählten Simulationszeitraum von 30 Tagen die Einschwingvorgänge noch nicht abgeklungen. Ließ man die Simulation weiterlaufen, so stellte sich erst ab einer Simulationszeit von ca. 3000 Tagen eine ziemlich stabile mittlere Durchlaufzeit ein. Daher wurde ein neuer Simulationszeitraum von 5000 Tagen gewählt und die Simulationsläufe wiederholt. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse:

LG	ZDL_nonspl [Std]		
	Sim_Zeit 30 Tage	Sim_Zeit 5000 Tage	u
6	76	1269600	0,99998
8	62	1233	0,99992
10	42,4	74,5	0,966
12	32,05	42,5	0,933
14	29,1	38,25	0,916
16	27,65	37,55	0,9
18	28,3	36,25	0,886
20	29	37,2	0,873
22	29,2	37,4	0,863

Tabelle 10: ZDL bei verschiedenen Simulationszeiträumen

Nun können diese neuen Werte in das Diagramm übertragen werden (zwecks Übersichtlichkeit und Zeitaufwand wird hier nur noch der nonsplit- Fall abgebildet, für den split- Fall ist aber ein ähnliches Ergebnis zu erwarten) :

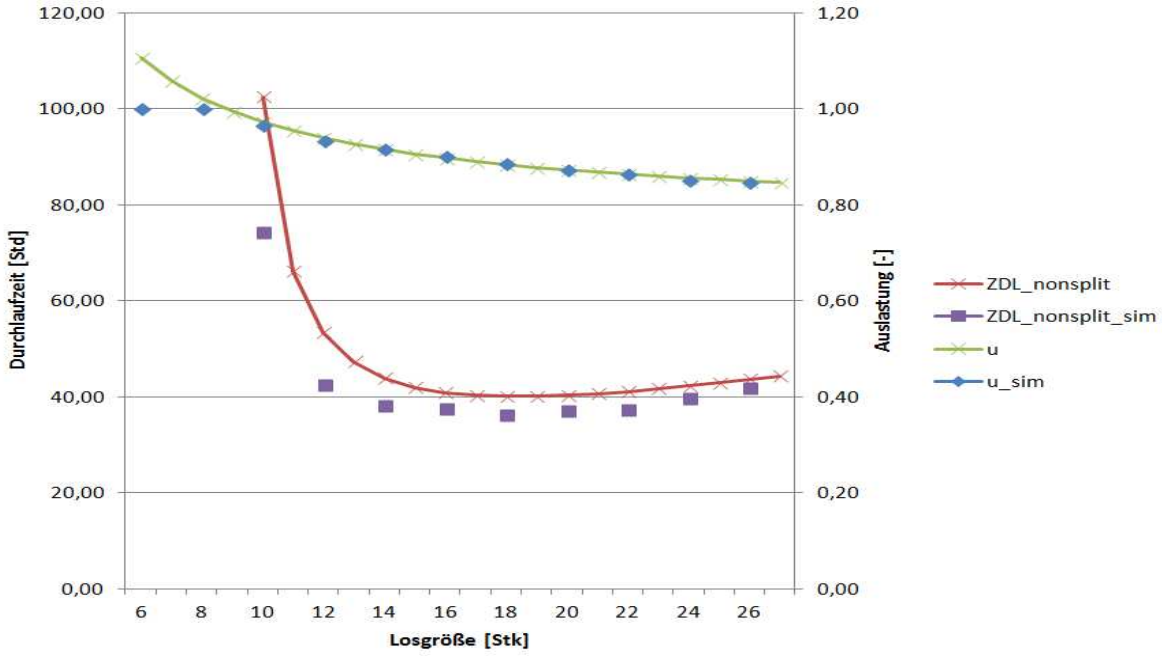


Abbildung 62: Durchlaufzeit bei geänderter Simulationszeit (für t_a = konst)

Nun stimmen die Simulationspunkte bei allen Losgrößen ziemlich genau mit dem errechneten Verlauf überein. Vor allem im hoch ausgelasteten Bereich ergeben sich nun auch in der Simulation extrem hohe Werte (für die Losgrößen 6 und 8 pendeln sich diese nicht mehr ein, sondern steigen mit länger werdender Simulationszeit stetig weiter an), welche im Diagramm aus Übersichtsgründen nicht dargestellt sind, aber in Tabelle 10 abgelesen werden können. Außerdem stimmen die Auslastungsgrade aus der Berechnung mit jenen aus der Simulation bei solch langen Zeiträumen ziemlich genau überein, was beim Simulationszeitraum von 30 Tagen nicht der Fall war (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9). Somit wurden mit der Verlängerung des Simulationszeitraums und der Erreichung eines "stationären" Zustandes die meisten aufgezeigten Unterschiede von vorhin beseitigt, es bleibt nur noch die - nun jedoch konstant bleibende - Überschätzung der Durchlaufzeit durch die Berechnung. Der Vollständigkeit halber soll hier auch das Diagramm aus Abschnitt 5.3.3.1 mit den Simulationsdaten (mit Simulationszeit 5000 Tage) dargestellt werden, da sich auch hier die simulierten Punkte nun weitaus besser mit den errechneten decken:

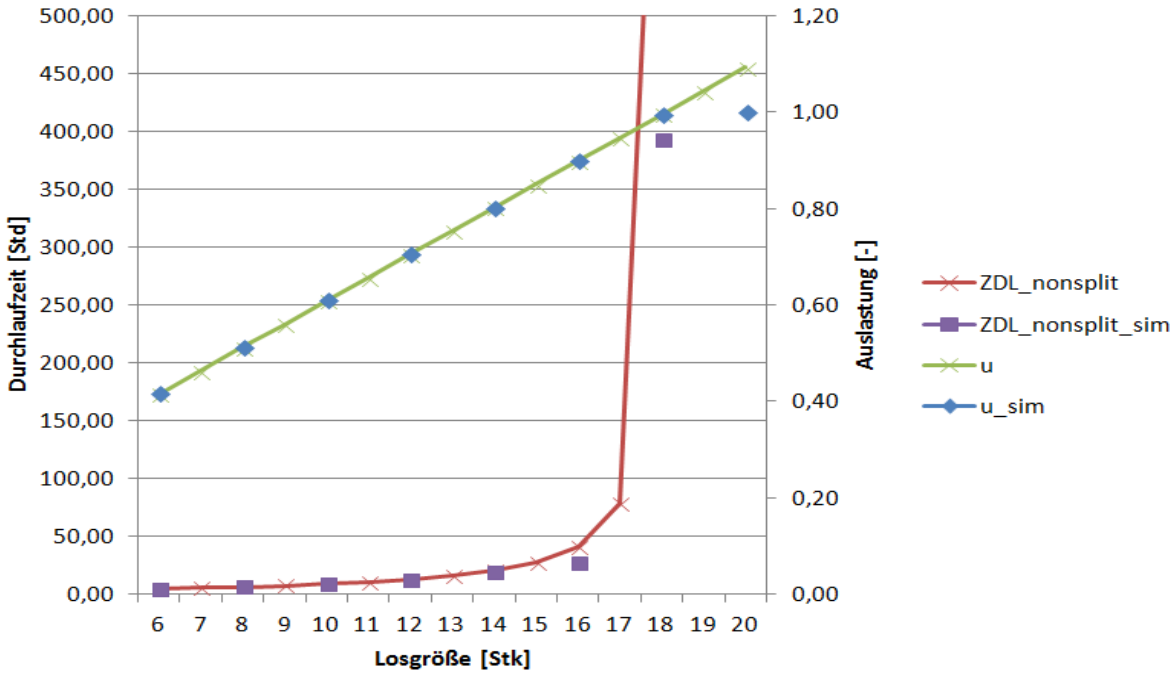


Abbildung 63: Durchlaufzeit bei geänderter Simulationszeit (für t_{a_Los}=konst)

In den folgenden Beispielen wird daher in den Modellen ein Plotter verwendet, der den Verlauf der Durchlaufzeit aufzeichnet und Auskunft darüber gibt, ob und ab wann ein stationärer Zustand erreicht wird. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Durchlaufzeit für das Beispiel aus dem aktuellen Abschnitt bei einer Losgröße von 24 Stück:

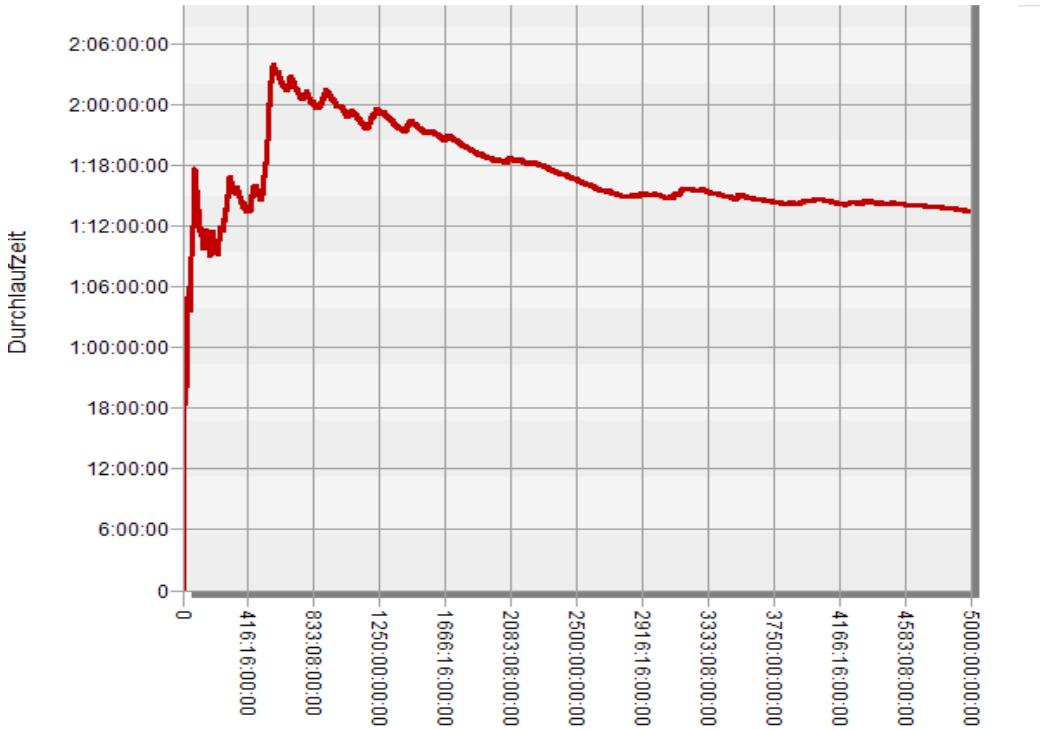


Abbildung 64: Einschwingvorgang bei stochastischen Prozessen

Es konnte festgestellt werden, dass der Einschwingvorgang sowohl von den Variationskoeffizienten des Zugangs - und Bearbeitungsprozesses wie auch von der Auslastung abhängt. Bei Losgröße 10 war beispielsweise ein endgültiger stationärer Zustand erst bei ca. 9000 Tagen Simulationszeit erkennbar.

Aus Sicht des Autors ist diese Erkenntnis über den benötigten Simulationszeitraum aus zwei Gründen bemerkenswert:

- Zum einen ist es offensichtlich nicht ausreichend, eine Simulation über den realen Planungszeitraum durchzuführen, bzw. werden auf diese Weise oftmals sehr ungenaue Ergebnisse erzielt. Dies erschwert die Arbeit mit Simulationswerkzeugen zusätzlich, da immer überprüft werden muss, ab wann sich die Zielwerte einschwingen und vernünftige Aussagen getroffen werden können. Bei größeren Modellen ist es oft aus zeitlichen Gründen nur schwer möglich, wie in diesem Beispiel 5000 Tage zu simulieren.
- Zum anderen ist zu hinterfragen, wie aussagekräftig die Berechnungen von Durchlaufzeiten sind, falls von Stichproben (siehe Abschnitt 5.3.4) ausgehend auf Verteilungen mit einer bestimmten Streuung geschlossen wird, welche offensichtlich die Dauer des Einschwingvorgangs beeinflusst. Somit kann man wahrscheinlich bei hoch variablen Tätigkeiten (Bedienungszeiten) mit einer Prognose basierend auf einem eingeschwungenen, stationären Zustand ziemlich weit danebenliegen.

5.3.4 "Reale" Betriebsdaten aus Stichprobe

In diesem Abschnitt soll nun der in Abschnitt 5.3.1 beschriebene Prozess ohne weitere Annahmen und Restriktionen behandelt werden. Dabei erfolgt zunächst die Berechnung der wichtigsten Zeitgrößen gemäß der Theorie aus den vorangegangenen Kapiteln. Den Ausgangspunkt der Berechnungen bilden dabei Stichproben von "beobachteten" Bearbeitungszeiten und Ankunftsintervallen.

5.3.4.1 Berechnung der Bearbeitungsparameter

An der betrachteten Fräsmaschine wurden folgende Bearbeitungszeiten in einer Stichprobe mit n = 10 beobachtet.

Arbeitsvorgang i	t_{0i}[min]
1	23
2	20
3	21
4	24
5	19
6	18
7	26
8	21
9	22
10	18

Tabelle 11: Stichprobe Bearbeitungszeiten

Anmerkung: *In einer realen Fertigungsumgebung sollten weitaus größere Stichproben genommen werden, außerdem sollten mehrere Stichproben zu unterschiedlichen Zeitpunkten verglichen werden.*

Aus den Werten in Tabelle 11 ergibt sich ein Mittelwert von

$$t_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{0,i}}{n} = \frac{212\ [min]}{10} = 21{,}2\ [min] = 0{,}3533\ [Std]$$

und eine Standardabweichung von

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^{n} (t_{0,i} - t_0)^2} = 0{,}0414\ [Std]$$

Der für die weitere Berechnung relevante Variationskoeffizient ergibt sich damit zu

$$c_0 = \frac{\sigma_0}{t_0} = 0{,}1171$$

Als nächsten Schritt bezieht man die Verfügbarkeit der Maschine mit ein, welche sich im vorliegenden Fall zu

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = 0{,}914$$

ergibt. Damit errechnet sich eine (vorläufige) effektive mittlere Prozesszeit von

$$t_e = \frac{t_0}{A} = 0{,}3865\ [Std]$$

und ein Variationskoeffizient von (c_{MTTR} wird mit 1 angenommen)

$$c_e{}^2 = c_0{}^2 + A * (1 - A) * \frac{MTTR}{t_0} + c_{MTTR} * A * (1 - A) * \frac{MTTR}{t_0} = 1{,}1595$$

Für die Ermittlung der tatsächlichen, effektiven Prozesszeit müssen noch gemäß Abschnitt 3.4.2.3 die Wartungsarbeiten in die Berechnung einbezogen werden. Es ergibt sich:

$$t_e = t_0 + \frac{t_s}{n_s} = 0{,}38665\ [Std]$$

$$\sigma_e{}^2 = \sigma_0{}^2 + \frac{\sigma_s^2}{n_s} + \frac{n_s - 1}{n_s{}^2} * t_s{}^2 = 0{,}204$$

$$c_e = \sqrt{\frac{\sigma_e{}^2}{t_e{}^2}} = 1{,}168$$

Somit wurde die Verteilung des tatsächlichen Bearbeitungsprozesses durch Bestimmung von Mittelwert und Variationskoeffizienten der effektiven Bearbeitungszeiten ermittelt. Sie stellt sich als eine allgemeine Verteilung dar, welche mit der Gammafunktion beschrieben werden kann. Weiters beinhalten diese Parameter nun bereits alle leistungsmindernden Einflüsse (Verfügbarkeit, Wartungen), somit müssen diese im Hinblick auf die Simulation nicht noch einmal an späterer Stelle berücksichtigt werden, auch bei den Rechenschritten, welche die Tageskapazität beinhalten, brauchen die Verfügbarkeit sowie Wartungsarbeiten nicht noch einmal mit einbezogen werden.

5.3.4.2 Exkurs: Erläuterungen zur Gammaverteilung

Die Gammafunktion ist *"eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Menge der positiven reellen Zahlen. Sie ist einerseits eine direkte Verallgemeinerung der Exponentialverteilung und andererseits eine Verallgemeinerung der Erlang-Verteilung für nichtganzzahlige Parameter."*[306] Ihre Dichtefunktion ist vollständig durch die beiden Parameter Alpha (α) und Beta (β) definiert:

[306] www.wikipedia.org, aufgerufen am 05.04. 2015

$$f(x) = \frac{\beta^{-\alpha} * x^{\alpha-1} * e^{\frac{-x}{\beta}}}{Gamma(\alpha)} \quad \textbf{(5.1)}$$

$f(x)$	$Dichtefunktion$
$Gamma\ (\alpha)$	$Gammafunktion\ (\alpha > 0)$
α	$alpha\ [-]$
β	$beta\ [-]$

Die beiden Parameter α und β sind damit in ihrer Aussagekraft mit den Parametern für Mittelwert und Varianz äquivalent. Die Umrechnungen (in Bezug auf das vorliegende Beispiel mit t_e als Mittelwert und c_e als Variationskoeffizient der Bearbeitungszeit) lauten:

$$\alpha = (\frac{1}{c_e})^2 \quad \textbf{(5.2)}$$

und

$$\beta = \frac{t_e}{\alpha} \quad \textbf{(5.3)}$$

Durch geeignete Wahl der Parameter ergeben sich die beiden Spezialfälle der Erlang- und der Exponentialverteilung. Abbildung 65 zeigt die Dichtefunktion der Gammaverteilung für verschiedene Variationskoeffizienten.

Man erkennt anhand dieses Diagramms, wie sich die Häufigkeiten der auftretenden Bearbeitungszeiten verteilen. So liegen im vorliegenden Fall (blaue Linie) sehr stark streuende Inhalte vor, laut der Dichtefunktion treten auch noch Zeiten bis zu 1 Stunde und länger auf (Die Funktion verläuft bei höheren Werten sehr flach, das bedeutet, sehr hohe Werte sind zwar selten, können jedoch auftreten). Zum Vergleich sind im obigen Diagramm der Fall exponentialverteilter Zeiten sowie von Zeiten mit deutlich geringerer Streuung eingezeichnet. So erkennt man beispielsweise bei der violetten Linie (c = 0,2), dass bei einem geringen Variationskoeffizient (also einer geringen Standardabweichung, hier gleich einem Fünftel des Mittelwerts) sich der Großteil der Zeiten um den Mittelwert schart. Es treten in diesem Fall kaum Zeiten über 30 Minuten oder unter 15 Minuten auf. Der Prozess ist in diesem Fall sehr gut kontrolliert. Allgemein lässt sich also sagen, dass bei hoher Varianz sehr viele Werte weit entfernt vom Mittelwert liegen, bei sehr niedriger Varianz liegen die meisten Werte sehr nah am Mittelwert.

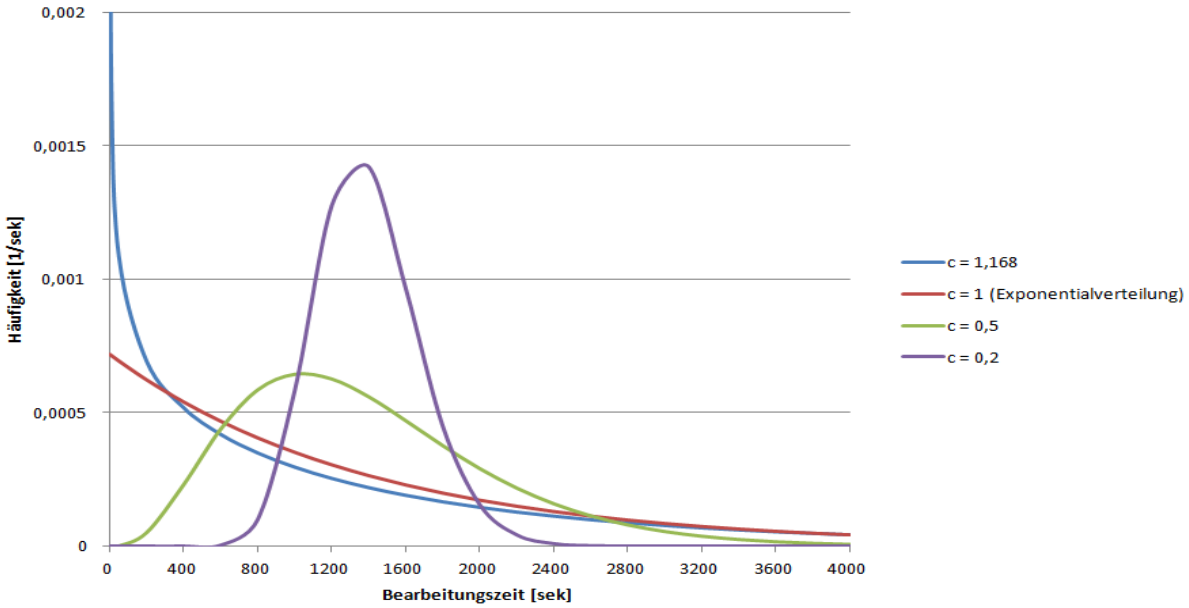


Abbildung 65: Dichtefunktionen der Gammaverteilung

Das Diagramm der zugehörigen Verteilungsfunktionen findet sich in Abbildung 96 im Anhang.

5.3.4.3 Berechnung der Ankunftsparameter

Um das Ankunftsverhalten der Paletten an der Station abschätzen zu können, wurde auch hier eine Stichprobe genommen. Nach Auswertung der Ankunftszeitpunkte und Einbeziehung der Arbeitsschichten ergaben sich folgende Zwischenankunftszeiten:

Wert Nr.	$t_{a,Los}$ [Std]
1	8,5
2	8,3
3	7,6
4	7,9
5	8
6	8,3
7	7,5
8	7,6
9	8,1
10	8,2

Tabelle 12: Stichprobe Ankunftsintervalle

Daraus errechnet sich analog zur Vorgehensweise in Abschnitt 5.3.4.1 ein Mittelwert von 8 Stunden und ein Variationskoeffizient von $c_{a,Los} = 0{,}0429$. Somit stellt auch der Ankunftsprozess eine allgemeine Verteilung dar, deren Dichtefunktion einen sehr spitzen und schmalen Verlauf aufweist (die auftretenden Werte liegen alle sehr nahe am Mittelwert, weitaus größere bzw. kleinere Werte sind also sehr unwahrscheinlich).

Mit den vorliegenden Daten kann nun für den "realen" Fall die Berechnung der Zeitgrößen in Abhängigkeit variierender Losgrößen erfolgen.

5.3.4.4 konstante Zwischenankunftszeiten

Zuerst soll erneut der Fall losgrößenunabhängiger Ankunftszeiten betrachtet werden. An dieser Stelle wird der Rechengang unter Verwendung der Formeln aus den Kapiteln 3 und 4 bis hin zur Ermittlung der Durchlaufzeit dargestellt.

Die zu bearbeitenden Werkstücke kommen in Losen mit einer konstanten Zwischenankunftszeit von

$$t_{a,Los} = 8\ [Std]$$

und einem Variationskoeffizienten von

$$c_{a,Los} = 0{,}0429$$

an der Maschine an. Die effektive Prozesszeit eines Loses (bei Wahl einer Fertigungslosgröße von 10 Stück) ergibt sich zu:

$$t_{e,Los} = x * t_e + t_r = 4{,}87\ [Std]$$

Der Variationskoeffizient der Bearbeitungszeit des Loses ergibt sich zu:

$$c_{e,Los} = \sqrt{\frac{c_e^2}{x}} = 0{,}37$$

Daraus errechnet sich eine Auslastung der Station von:

$$u = \frac{r_a}{x} * (x * t_e + t_r) = r_a * \left(t_e + \frac{t_r}{x}\right) = 0{,}61$$

Mit den vorliegenden Werten lässt sich nun die Wartezeit ZW berechnen:

$$ZW_{Los}(G|G|1) = \left(\frac{{c_{a,Los}}^2 + {c_{e,Los}}^2}{2}\right) * \left(\frac{u}{1-u}\right) * t_{e,Los} = 0{,}52\ [Std]$$

Bei losweisem Zugang und einem Weitertransport in der Transportlosgröße 1 kommt es zu einer Loswartezeit ZWL von:

$$ZWL_{split} = \frac{(x-1)}{2} * t_e = 1{,}74\ [Std]$$

Schlussendlich ergibt sich die gesamte Durchlaufzeit eines Fertigungsloses durch das Arbeitssystem "Fräsmaschine" zu

$$ZDL_{split} = ZW + t_e + t_r + ZWL = 3{,}65\ [Std]$$

Das heißt, unter den beschriebenen Voraussetzungen und einer Losgröße von 10 verweilt ein zu bearbeitendes Los im Mittel 3,65 Stunden an der Frässtation. Im Falle eines geschlossenen Transportes vor und nach der Station (Transportlosgröße = Fertigungslosgröße) ändert sich der Zeitanteil ZWL zu

$$ZWL_{nonsplit} = (x-1) * t_e = 3{,}48\ [Std]$$

Da die restlichen Zeitanteile gleich bleiben, folgt für die Durchlaufzeit:

$$ZDL_{nonsplit} = ZW + t_e + t_r + ZWL = 5{,}39\ [Std]$$

Nun kann man die gerade durchgeführten Rechenschritte für die verschiedenen Losgrößen (analog zu den vorherigen Abschnitten) durchführen. In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Berechnungen wie auch wieder die entsprechenden Simulationsdaten aufgelistet:

Parameter										
x [Stk]	t_r [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	$c_{e,Los}$	α	β	$t_{a,Los}$ [Std]	$c_{a,Los}$	u [1]	α	β
6	1	3,32	0,48	0,73	1898,79	8	0,043	0,41	543,40	53,00
7	1	3,71	0,44	0,73	1898,79	8	0,043	0,46	543,40	53,00
8	1	4,09	0,41	0,73	1898,79	8	0,043	0,51	543,40	53,00
9	1	4,48	0,39	0,73	1898,79	8	0,043	0,56	543,40	53,00
10	1	4,87	0,37	0,73	1898,79	8	0,043	0,61	543,40	53,00
11	1	5,25	0,35	0,73	1898,79	8	0,043	0,66	543,40	53,00
12	1	5,64	0,34	0,73	1898,79	8	0,043	0,70	543,40	53,00
13	1	6,03	0,32	0,73	1898,79	8	0,043	0,75	543,40	53,00
14	1	6,41	0,31	0,73	1898,79	8	0,043	0,80	543,40	53,00
15	1	6,80	0,30	0,73	1898,79	8	0,043	0,85	543,40	53,00
16	1	7,19	0,29	0,73	1898,79	8	0,043	0,90	543,40	53,00
17	1	7,57	0,28	0,73	1898,79	8	0,043	0,95	543,40	53,00
18	1	7,96	0,28	0,73	1898,79	8	0,043	0,99	543,40	53,00
19	1	8,35	0,27	0,73	1898,79	8	0,043	1,04	543,40	53,00
20	1	8,73	0,26	0,73	1898,79	8	0,043	1,09	543,40	53,00

Tabelle 13: Eingangsdaten $t_{a,Los}$=konst

Wie erwartet tritt eine Überlastung des Systems genau dann auf, wenn die Losbearbeitungszeit die Zwischenankunftszeit der Lose überschreitet (in diesem Fall bei x = 19 Stück).

berechnete Kennzahlen						Simulationswerte		
ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$ZWL_{nonsplit}$ [Std	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$ZDL_{nonsplit}$ [Std]	DLZ_{split}	$DLZ_{nonsplit}$	$u_{nonsplit}$
0,27	0,97	1,93		2,62	3,59		3,3	0,419
0,31	1,16	2,32		2,86	4,02			
0,37	1,35	2,71		3,11	4,46		4,1	0,515
0,44	1,55	3,09		3,37	4,92			
0,52	1,74	3,48		3,65	5,39		4,90	0,612
0,63	1,93	3,87		3,95	5,89			
0,78	2,13	4,25		4,29	6,42		5,75	0,708
0,98	2,32	4,64		4,69	7,01			
1,29	2,51	5,03		5,19	7,70		6,8	0,805
1,79	2,71	5,41		5,88	8,59			
2,76	2,90	5,80		7,05	9,95		8,6	0,901
5,51	3,09	6,19		9,99	13,09			
61,15	3,29	6,57		65,82	69,11		76,76	0,998
-7,40	3,48	6,96		-2,54	0,94			
-3,64	3,67	7,35		1,42	5,09		5303	1

Tabelle 14: Zeitgrößen $t_{a,Los}$=konst

Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der errechneten Durchlaufzeitverläufe wie auch der Auslastung bei Variation der Losgröße:

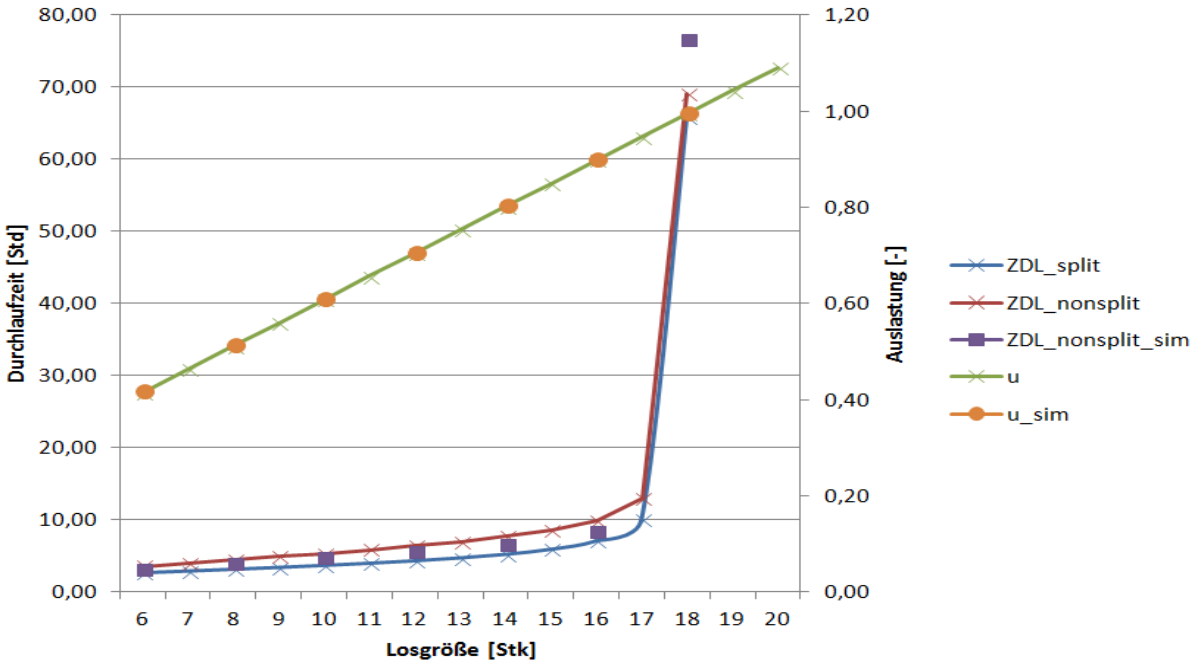


Abbildung 66: Ergebnisse für realen Prozess, t_{a_Los}=konst

Man erkennt sofort, dass die Durchlaufzeit unter den genannten Rahmenbedingungen zuerst relativ linear , bei höher werdender Auslastung jedoch überproportional mit der Losgröße ansteigt. Dieser Umstand ist durch eine kurze Überlegung schnell zu verstehen. Bleiben die Abstände zwischen den angelieferten Paletten gleich, so ist die Auslastung der Station ausschließlich von der Losgröße und der Prozesszeit pro Teil abhängig. Die Bearbeitungszeit des Loses steigt (bei konstanter Bearbeitungszeit der Teile sowie konstanter Rüstzeit) proportional mit der Losgröße an. In Folge steigt auch die Auslastung der Station durch die konstante Zwischenankunftszeit bei gleichzeitig größer werdender Bearbeitungszeit der Lose linear an. Da aber in der Gleichung für die Wartezeit ZW der Term (u/(1-u)) enthalten ist, sieht man sofort, dass, sobald sich u dem Wert 1 nähert, der Nenner gegen 0 läuft, und mit ihm die Wartezeit vor der Station gegen Unendlich strebt (Stau der Paletten).

5.3.4.5 Ankunftsintervalle abhängig von Losgröße

Kommen die Paletten mit den Werkstücken nun wieder in ihrem Inhalt entsprechenden Abständen an der Arbeitsstation an, so ändert sich der Durchlaufzeit- und Auslastungsverlauf wieder analog zu Abschnitt 5.3.3.2. Die folgenden Tabellen zeigen die rechnerischen Ergebnisse für diesen Fall:

Parameter										
x [Stk]	t_r [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	$c_{e,Los}$	α	β	$t_{a,Los}$ [Std]	$c_{a,Los}$	u [1]	α	β
6	1	3,32	0,48	0,7331	1898,79	3	0,043	1,11	543,40	19,88
7	1	3,71	0,44	0,7331	1898,79	3,5	0,043	1,06	543,40	23,19
8	1	4,09	0,41	0,7331	1898,79	4	0,043	1,02	543,40	26,50
9	1	4,48	0,39	0,7331	1898,79	4,5	0,043	1,00	543,40	29,81
10	1	4,87	0,37	0,7331	1898,79	5	0,043	0,97	543,40	33,13
11	1	5,25	0,35	0,7331	1898,79	5,5	0,043	0,96	543,40	36,44
12	1	5,64	0,34	0,7331	1898,79	6	0,043	0,94	543,40	39,75
13	1	6,03	0,32	0,7331	1898,79	6,5	0,043	0,93	543,40	43,06
14	1	6,41	0,31	0,7331	1898,79	7	0,043	0,92	543,40	46,38
15	1	6,80	0,30	0,7331	1898,79	7,5	0,043	0,91	543,40	49,69
16	1	7,19	0,29	0,7331	1898,79	8	0,043	0,90	543,40	53,00
17	1	7,57	0,28	0,7331	1898,79	8,5	0,043	0,89	543,40	56,31
18	1	7,96	0,28	0,7331	1898,79	9	0,043	0,88	543,40	59,63
19	1	8,35	0,27	0,7331	1898,79	9,5	0,043	0,88	543,40	62,94
20	1	8,73	0,26	0,7331	1898,79	10	0,043	0,87	543,40	66,25
21	1	9,12	0,25	0,7331	1898,79	10,5	0,043	0,87	543,40	69,56
22	1	9,51	0,25	0,7331	1898,79	11	0,043	0,86	543,40	72,88
23	1	9,89	0,24	0,7331	1898,79	11,5	0,043	0,86	543,40	76,19
24	1	10,28	0,24	0,7331	1898,79	12	0,043	0,86	543,40	79,50
25	1	10,67	0,23	0,7331	1898,79	12,5	0,043	0,85	543,40	82,81
26	1	11,05	0,23	0,7331	1898,79	13	0,043	0,85	543,40	86,13

Tabelle 15: Eingabedaten für G|G|1, t_a = konst

Wieder tritt eine Überlastung - analog zu Abschnitt 5.3.3.2- bei sehr kleinen Losgrößen auf, da in der Losbearbeitungszeit die konstante Rüstzeit enthalten ist. Die errechneten wie auch die simulierten Ergebnisse für die Warte- und Durchlaufzeit steigen daher bei kleiner werdenden Losgrößen stark an.

berechnete Kennzahlen						Simulationswerte			
ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$WL_{nonsplit}$ [Std	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$ZDL_{nonsplit}$ [Std]	DLZ_{split}	u_{split}	$DLZ_{nonsplit}$	$u_{nonsplit}$
-3,95	0,97	1,93		-1,59	-0,63				
-6,54	1,16	2,32		-3,99	-2,83				
-15,49	1,35	2,71		-12,75	-11,39	1369,75	0,99999	1695,2	0,99999
76,56	1,55	3,09		79,49	81,04				
12,27	1,74	3,48		15,39	17,13	10,05	0,9716	11,85	0,97
7,04	1,93	3,87		10,36	12,29				
5,10	2,13	4,25		8,61	10,74	6,30	0,938	8,45	0,938
4,09	2,32	4,64		7,80	10,12				
3,48	2,51	5,03		7,38	9,89	5,65	0,914	8,3	0,918
3,06	2,71	5,41		7,16	9,86				
2,76	2,90	5,80		7,05	9,95	5,60	0,8965	8,5	0,897
2,54	3,09	6,19		7,02	10,11				
2,36	3,29	6,57		7,04	10,32	5,75	0,883	9,1	0,887
2,22	3,48	6,96		7,09	10,57				
2,11	3,67	7,35		7,17	10,84	5,90	0,872	9,65	0,876
2,01	3,87	7,73		7,27	11,13				
1,93	4,06	8,12		7,38	11,44	6,20	0,862	10,3	0,867
1,86	4,25	8,51		7,50	11,76				
1,80	4,45	8,89		7,64	12,08	6,45	0,855	10,9	0,859
1,75	4,64	9,28		7,78	12,42				
1,70	4,83	9,67		7,92	12,76	6,75	0,848	11,65	0,853

Tabelle 16: Zeitgrößen für G|G|1, ta=konst

Wiederum sollen die Ergebnisse auch in Diagrammform dargestellt werden:

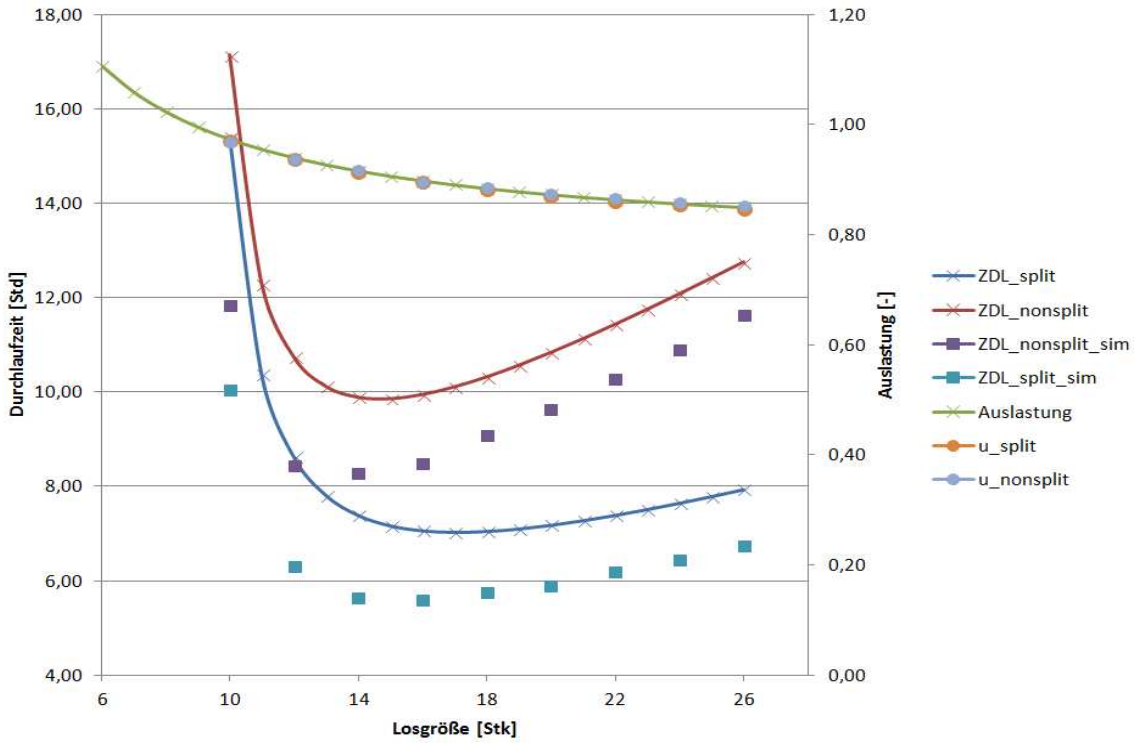


Abbildung 67: Ergebnisse für realen Prozess, t_a konst

Hier zeigt sich nun wieder ähnlich wie in Abschnitt 5.3.3.2 der "typische" Verlauf der Durchlaufzeit in Abhängigkeit von der Losgröße. Der Unterschied zum M|M|1 Fall vorn vorhin besteht im weit niedrigeren Niveau der Durchlaufzeitkurven. Dies kann vornehmlich durch die weitaus geringere Variabilität der Ankunftszeiten bei nur geringfügig höherer Variabilität der Bearbeitungszeiten erklärt werden. Jedoch wird auch hier wieder deutlich, dass bei kleinen Losgrößen aufgrund der konstanten Rüstzeit eine sehr hohe Auslastung und damit verbunden extrem hohe Durchlaufzeiten auftreten. Im Bereich kleiner Losgrößen und hoher Auslastung dominiert also der Wartezeitterm. Dieser Effekt nimmt bei abnehmender Auslastung sehr schnell stark ab, bis ein Minimum erreicht wird. Ab da bleibt die Wartezeit ZW annähernd konstant bzw. nimmt weiterhin leicht ab, während der Term ZWL, welcher zuerst einen nur sehr kleinen Anteil an der Durchlaufzeit bildete, weiterhin linear mit der Losgröße ansteigt. Dadurch ergibt sich diese Form, welche im vorliegenden Beispiel auch über ein sehr ausgeprägtes Minimum verfügt (vor allem im nonsplit - Fall). Bemerkenswert ist, dass hier eine starke, wenn auch konstante Überschätzung der Durchlaufzeiten durch die Warteschlangentheorie beobachtbar ist. Dies stellt im Prinzip aber kein kritisches Problem dar, da eine Überschätzung der Durchlaufzeit in der Planung den Liefertermin der Aufträge nicht gefährdet. Allerdings werden die Aufträge in diesem Fall zu früh in die Fertigung übergeben, was bei termingenauem Bedarf zu erhöhten Lagerbeständen des Endproduktes führt. Jedoch könnte hier durch Weiterentwicklungen der Gleichung für die Wartezeit aus Abschnitt 3.7.3 eine bessere Übereinstimmung erzielt werden.

5.4 Beispiel 2 - eine Arbeitsstation - mehrere unterschiedliche Aufträge

Das Produktportfolio eines Produktionsbetriebes besteht selten nur aus einem Auftrag (=Produkt), sondern vielmehr aus mehreren Produkten, welche zumeist auch sehr unterschiedliche Auftragsdaten besitzen. In diesem Beispiel soll auf diesen Fall eingegangen werden. Es wird jedoch auch hier eine einstufige Fertigung angenommen, in welcher jedes Produkt bis zu seiner Fertigstellung genau einen Arbeitsgang durchläuft, jenen an Maschine 1 (dieselbe Fräsmaschine wie in Beispiel 1).

5.4.1 Rahmenbedingungen, Szenario

Zu fertigen sind drei unterschiedliche Aufträge A, B und C. Wie in einer realen Produktion liegen als Ausgangsdaten der Bedarf, der Planungszeitraum (also der Zeitraum, in welchem der Bedarf produziert werden muss) und die Bearbeitungszeiten der einzelnen Produkte auf der Arbeitsstation vor. Dabei stellt Produkt A das Erzeugnis aus dem vorigen Beispiel dar. Die folgende Tabelle fasst die erforderlichen Eckdaten zusammen:

	A		B		C	
AS\Auftrag	t_e [Std]	t_r [Std]	t_e [Std]	t_r [Std]	t_e [Std]	t_r [Std]
1	0,38667	1	0,3	1,5	0,25	1
t_a [Std]	1,33		1,60		1,00	
Planungszeitraum	400		400		400	
Bedarf	300		250		400	

Tabelle 17: Eckdaten Aufträge A,B und C

Aus den Bedarfen und dem Planungszeitraum von 25 Werktagen (TKAP = 16 Std) ergibt sich für jedes Produkt ein erforderliches Ankunftsintervall der Einzelstücke. In diesem Beispiel sollen der Einfachheit halber alle Bearbeitungszeiten als konstant angenommen werden. Die Zwischenankunftszeiten der Lose werden als exponentialverteilt vorausgesetzt. Außerdem wird angenommen, dass in den Stückbearbeitungszeiten der einzelnen Produkte bereits alle leistungsmindernden Einflüsse gemäß der Vorgehensweise in Abschnitt 5.3.4 berücksichtigt wurden. Die folgende Abbildung zeigt das Modell in Plant Simulation, mit welchem in weiterer Folge die Simulationsdaten ermittelt werden:

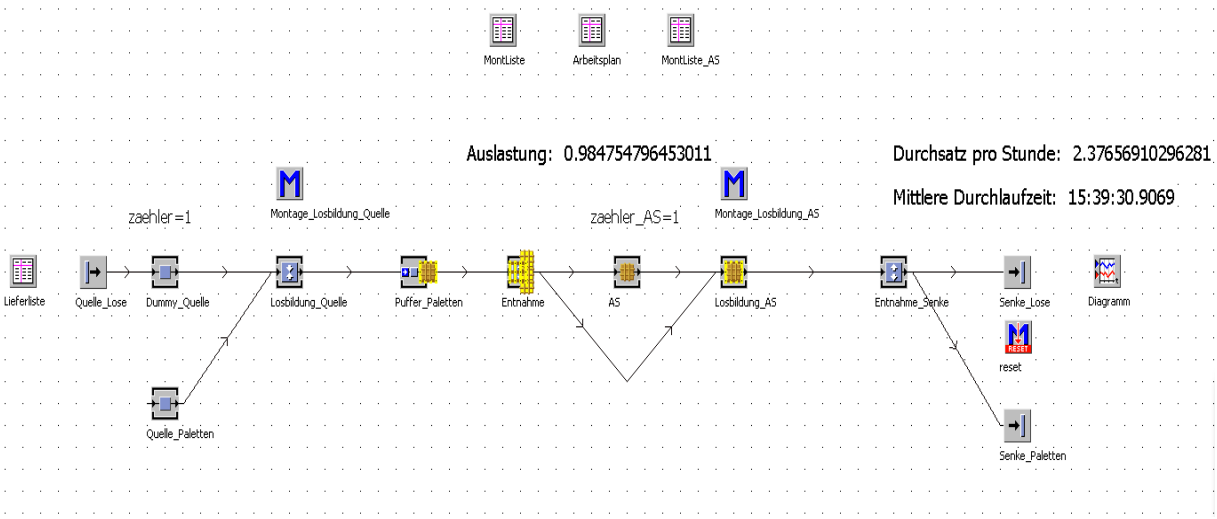


Abbildung 68: Mehrproduktfall in Plant Simulation

5.4.2 Ermittlung einer "optimalen" Losgrößenkombination

Gemäß Abschnitt 4.4.1 können zur näherungsweisen Ermittlung der Losgrößen unterschiedlichste Verfahren angewandt werden. Hier soll zur ersten Näherung die Vorgehensweise aus Abschnitt 0 angewandt werden und danach noch eine Verfeinerung gemäß Abschnitt 4.4.1.1 vorgenommen werden.

Die produktive Auslastung u_0, die optimale Auslastung u^x, die mittlere Rüstzeit $t_{r,m}$ sowie der Hilfswert L ergeben sich unter Verwendung der Gleichungen (4.30), (4.32), (4.33) und (4.34) zu:

u_0	u^x	$t_{r,m}$ [Std]	L
0,7275025	0,85293757	1,16666667	7,71389858

Tabelle 18: Hilfswerte für Loßgrößenermittlung

In weiterer Folge ergeben sich mittels Gleichung (4.35) sowie nach Anpassung an den Bedarf (ganzzahlige Losgrößen, ganzzahlige Losanzahl) für die Produkte A, B und C folgende "optimale" Losgrößen:

	A	B	C
x^x	17,36	20,71	26,86
x^x, Bedarf	18	21	27
Anz. Lose	17	12	15

Tabelle 19: "optimale" Losgrößen

Das bedeutet, eine Losgrößenkombination von (18, 21, 27) sollte zu einer annähernd minimalen Durchlaufzeit führen. Wie sich im Vergleich mit anderen Kombinationen mittels

Berechnungen sowie Simulationsläufen herausstellte, liefert dieser Satz an Losgrößen tatsächlich einen Zielwert nahe dem absoluten Minimum.

Jedoch soll nun noch eine Feinabstimmung mittels der partiellen Optimierung erfolgen. Es werden zuerst die Losgrößen der Produkte B und C "festgehalten" und jene des Produktes A in Schrittweiten von 1 verändert. Die folgenden Tabellen zeigt die Vorgehensweise und die Ergebnisse für den Zielwert ZDL_m:

Variation x von A														
A					B					C				
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]
13	24	312	17,33	6,03	21	12	252	33,60	7,80	27	15	405	27,00	7,75
14	22	308	18,67	6,41	21	12	252	33,60	7,80	27	15	405	27,00	7,75
15	20	300	20,00	6,80	21	12	252	33,60	7,80	27	15	405	27,00	7,75
16	19	304	21,33	7,19	21	12	252	33,60	7,80	27	15	405	27,00	7,75
17	18	306	22,67	7,57	21	12	252	33,60	7,80	27	15	405	27,00	7,75
18	17	306	24,00	7,96	21	12	252	33,60	7,80	27	15	405	27,00	7,75
19	16	304	25,33	8,35	21	12	252	33,60	7,80	27	15	405	27,00	7,75
20	15	300	26,67	8,73	21	12	252	33,60	7,80	27	15	405	27,00	7,75

Tabelle 20: partielle Optimierung für Produkt A

ta,Los,m	te,Los,m	um	ca,Los,m	ce,Los,m	ZW,m	ZDL,m
8,03	6,96	0,87	1,00	0,13	23,03	29,99
8,31	7,17	0,86	1,00	0,09	22,73	29,90
8,56	7,36	0,86	1,00	0,07	22,54	29,89
8,80	7,53	0,86	1,00	0,04	22,43	29,96
9,02	7,69	0,85	1,00	0,01	22,38	30,07
9,22	7,84	0,85	1,00	0,01	22,38	30,22
9,41	7,99	0,85	1,00	0,03	22,42	30,40
9,59	8,12	0,85	1,00	0,06	22,49	30,61

Tabelle 21: Ergebnisse der partiellen Optimierung

Man erkennt, dass sich eine weitere, wenn auch sehr kleine, Verbesserung der Zielgröße durch die Wahl einer Losgröße von 14 für Produkt A erzielen lässt, siehe Abbildung 69:

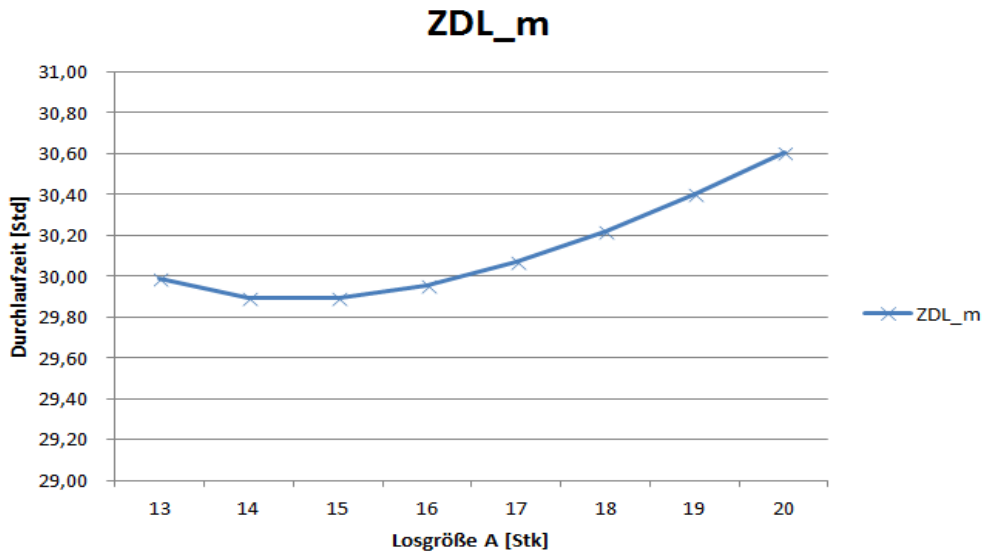


Abbildung 69: partielle Optimierung Produkt A

Analog verfährt man im Weiteren mit den Produkten B und C, wodurch sich schließlich die tatsächlich optimale mittlere Durchlaufzeit für eine Losgrößenkombination von 14 (Produkt A), 25 (B) und 23 Stück (C) einstellt. In den folgenden Tabellen ist der letzte Optimierungsschritt dargestellt:

Variation x von C														
A					B					C				
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	20	20	400	20,00	6,00
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	21	20	420	21,00	6,25
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	22	19	418	22,00	6,50
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	23	18	414	23,00	6,75
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	24	17	408	24,00	7,00
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	25	16	400	25,00	7,25
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	26	16	416	26,00	7,50
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	27	15	405	27,00	7,75
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	28	15	420	28,00	8,00

Tabelle 22: partielle Optimierung Produkt C

ta,Los,m	te,Los,m	um	ca,Los,m	ce,Los,m	ZW,m	ZDL,m
7,778	6,76	0,87	1,00	0,17	22,93	29,69
7,925	6,86	0,87	1,00	0,16	22,75	29,62
8,063	6,97	0,86	1,00	0,15	22,61	29,58
8,193	7,06	0,86	1,00	0,14	22,51	29,57
8,317	7,15	0,86	1,00	0,14	22,43	29,59
8,434	7,24	0,86	1,00	0,14	22,38	29,62
8,545	7,32	0,86	1,00	0,14	22,35	29,68
8,650	7,40	0,86	1,00	0,14	22,35	29,75
8,750	7,48	0,85	1,00	0,14	22,35	29,83

Tabelle 23: minimale mittlere Durchlaufzeit nach partieller Optimierung

Immerhin konnte der Zielwert durch die Verwendung der partiellen Optimierung um beinahe 40 Minuten bzw. 2% gesenkt werden. Oftmals sind durch eine partielle Optimierung noch weitaus größere Durchlaufzeitreduzierungen möglich (siehe Beispiel 4). Jedoch zeigt sich auch, dass bereits die alleinige Verwendung der ersten Näherung bereits zu einem recht guten Ergebnis führt. Allerdings ist hier zu beachten, dass die Optimierung unter Voraussetzung exponentialverteilter Ankunftszeiten vollzogen wurde. Setzt man regelmäßigere Ankünfte voraus, würden sich entsprechend kleinere optimale Losgrößen ergeben. Zum Vergleich sollen hier noch in Übersichtsform die Ergebnisse bei Verwendung der Heuristik aus Abschnitt 4.4.1.4 (orange) und des Verfahrens aus Abschnitt 4.4.1.3 (violett) dargestellt werden:

$x^{x\ Heuristik}$	16,39516093	31,69758438	25,35806751
$x^{x,\ Heuristik}$, Bedarf	17	32	26
Anz.Lose	43,01		
$t_{e,Los,m}^{x,\ Rüstzeit}$	6,77		
$x^{x,\ Rüstzeit}$	17,50	22,55	27,07
$x^{x,\ Rüstzeit}$, Bedarf	18	23	27

Tabelle 24: "optimale" Losgrößen über verschiedene Näherungsverfahren

Auch diese Verfahren liefern relativ robuste Ergebnisse (Tabellen dazu finden sich im Anhang zu Beispiel 2, Abschnitt 7.2). Bei einer anschließenden partiellen Optimierung gelangt man auch hier sehr schnell zur optimalen Kombination. Jedoch ist zu bedenken, dass (wie bereits erwähnt) die partielle Optimierung bei vielen Produkten ein sehr aufwendiges Verfahren darstellt, daher ist es angenehm zu wissen, dass bereits mit den ersten Näherungen recht brauchbare Ergebnisse erzielt werden können.

5.4.3 gemeinsame Variation der Losgrößen

Nun soll untersucht werden, welcher Effekt auftritt, wenn man die Losgrößen aller betrachteten Produkte gleichzeitig und gleichmäßig in dieselbe Richtung verändert. Erwartet wird dabei ein ähnlicher Effekt wie beim Einproduktfall, da sich die Produktlosgrößen schließlich in einem fixen Verhältnis zueinander befinden, welches sich durch die Variation nicht (bzw. nur sehr geringfügig) ändert. In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Losgrößenkombinationen sowie die sich damit ergebenden Losankunfts- und Losbearbeitungszeiten aufgeführt. Die Spalten "Output" überprüfen, ob der Bedarf im Betrachtungszeitraum gedeckt wird.

Variation alle x, AS 1														
A					B					C				
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]
7	43	301	9,33	3,71	11	23	253	17,60	4,80	9	45	405	9,00	3,25
8	38	304	10,67	4,09	13	20	260	20,80	5,40	11	37	407	11,00	3,75
9	34	306	12,00	4,48	15	17	255	24,00	6,00	13	31	403	13,00	4,25
10	30	300	13,33	4,87	17	15	255	27,20	6,60	15	27	405	15,00	4,75
11	28	308	14,67	5,25	19	14	266	30,40	7,20	17	24	408	17,00	5,25
12	25	300	16,00	5,64	21	12	252	33,60	7,80	19	22	418	19,00	5,75
13	24	312	17,33	6,03	23	11	253	36,80	8,40	21	20	420	21,00	6,25
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	23	18	414	23,00	6,75
15	20	300	20,00	6,80	27	10	270	43,20	9,60	25	16	400	25,00	7,25
16	19	304	21,33	7,19	29	9	261	46,40	10,20	27	15	405	27,00	7,75
17	18	306	22,67	7,57	31	9	279	49,60	10,80	29	14	406	29,00	8,25
18	17	306	24,00	7,96	33	8	264	52,80	11,40	31	13	403	31,00	8,75
19	16	304	25,33	8,35	35	8	280	56,00	12,00	33	13	429	33,00	9,25
20	15	300	26,67	8,73	37	7	259	59,20	12,60	35	12	420	35,00	9,75
21	15	315	28,00	9,12	39	7	273	62,40	13,20	37	11	407	37,00	10,25
22	14	308	29,33	9,51	41	7	287	65,60	13,80	39	11	429	39,00	10,75

Tabelle 25: gemeinsame Variation der Losgrößen

5.4.3.1 deterministische Zwischenankunftszeiten

Zuerst wird nun der Fall eines deterministischen Zugangsprozess, d. h. $c_a = 0$, untersucht. In Tabelle 26 sind die berechneten sowie die simulierten Ergebnisse für diese Konstellation aufgelistet:

								$c_{a,Los,m} = 0$	
$t_{a,Los,m}$	$t_{e,Los,m}$	u_m	$c_{a,Los,m}$	$\sigma_{eLos,m}$	$ce_{,Los,m}$	ZW_m	ZDL_m	$ZDL_{m,sim}$	$u_{m,sim}$
3,635	3,748	1,031	0,00	0,5739686	0,1531				
4,297	4,229	0,984	0,00	0,61668	0,1458	2,81	7,04	7,83	0,986
4,952	4,706	0,950	0,00	0,6676868	0,1419	0,90	5,61	5,58	0,951
5,604	5,180	0,924	0,00	0,7251267	0,1400	0,62	5,80		
6,254	5,653	0,904	0,00	0,7875131	0,1393	0,52	6,17	6	0,906
6,902	6,124	0,887	0,00	0,8537082	0,1394	0,47	6,59		
7,548	6,594	0,874	0,00	0,9228562	0,1400	0,45	7,04	6,9	0,872
8,193	7,063	0,862	0,00	0,9943162	0,1408	0,44	7,50	7,48	0,861
8,838	7,532	0,852	0,00	1,0676066	0,1417	0,44	7,97		
9,482	8,000	0,844	0,00	1,1423627	0,1428	0,44	8,44	8,3	0,845
10,125	8,468	0,836	0,00	1,2183057	0,1439	0,45	8,92		
10,768	8,936	0,830	0,00	1,2952203	0,1449	0,46	9,39	9,35	0,832
11,411	9,403	0,824	0,00	1,3729382	0,1460	0,47	9,87		
12,054	9,871	0,819	0,00	1,4513266	0,1470	0,48	10,35	10,3	0,8205
12,696	10,338	0,814	0,00	1,5302795	0,1480	0,50	10,83		
13,34	10,80	0,81	0,00	1,6097117	0,15	0,51	11,32	11,33	0,815

Tabelle 26: Ergebnisse bei $c_{a,Los,m}$ =0

Die anschließende Grafik fasst die Ergebnisse zusammen, wobei die Indizes 1 bis 14 auf der Abszisse für die Losgrößenkombination stehen (die in der vorigen Tabelle blau unterlegte Ausgangskombination besitzt Index 6):

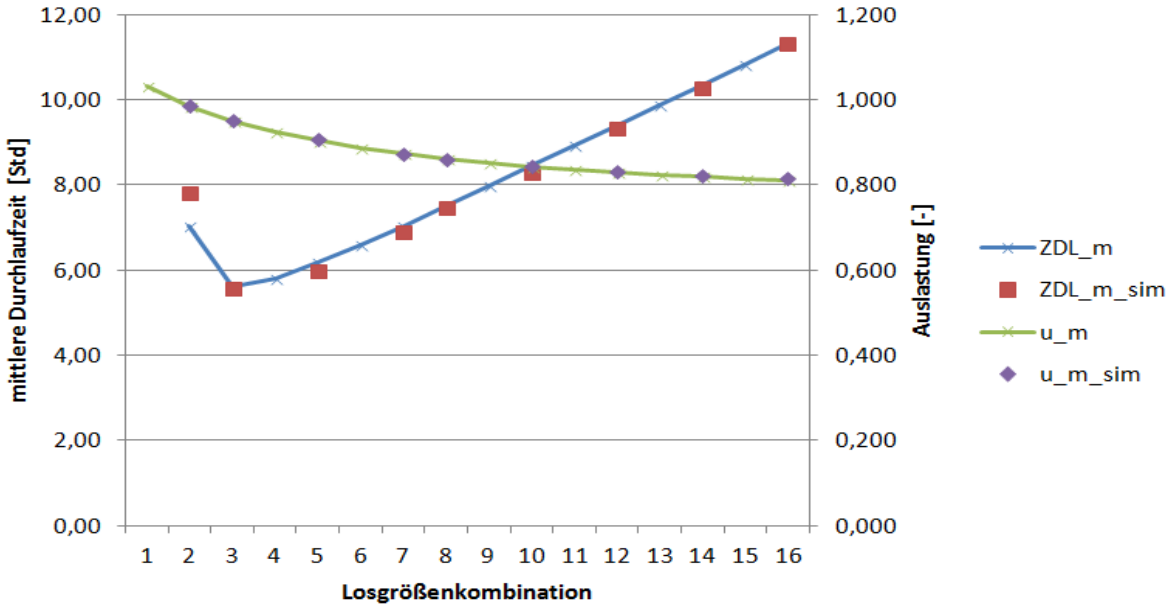


Abbildung 70: Variation aller Losgrößen, $c_{a,Los,m}$ = 0

Wie erwartet steigt die mittlere Durchlaufzeit beinahe linear mit den gleichmäßig größer werdenden Losgrößen an (vergleiche dazu 5.3.2.2). Die Auslastung sinkt durch den kleiner werdenden relativen Rüstanteil. Weiters ist zu beobachten, dass die simulierten Werte ziemlich gut mit den berechneten übereinstimmen. Nur bei sehr hoher Auslastung zeigt der simulierte Verlauf einen noch stärkeren Anstieg als der errechnete. Das heißt, dass die

Anwendung der Warteschlangentheorie bei sehr hohen Auslastungsgraden im Mehrproduktfall sogar eine Unterschätzung der Durchlaufzeit zur Folge hat.

5.4.3.2 exponentialverteilte Zwischenankunftszeiten

Nun soll analog zu Abschnitt 5.3.3.2 der Fall varianzbehafteter Losankünfte betrachtet werden. Vor allem bei vielen Vorgängermaschinen ist im Allgemeinen nicht von einer konstanten Zwischenankunftszeit auszugehen, da - wie in Beispiel 3 noch gezeigt werden soll - die Verteilungen der Bearbeitungszeiten und Ankunftsprozesse wie auch die Auslastungsgrade die Gestalt des Abgangsprozesses an diesen Vorgängern und damit den Ankunftsprozess an der betrachteten Station beeinflussen.

Die Ergebnisse einer gleichmäßigen Variation der Losgrößen für den Fall exponentialverteilter Losankünfte stellt die folgende Tabelle dar:

								$c_{a,Los,m} = 1$	
$t_{a,Los,m}$	$t_{e,Los,m}$	u_m	$c_{a,Los,m}$	$\sigma_{eLos,m}$	$ce_{,Los,m}$	ZW_m	ZDL_m	$ZDL_{m,sim}$	$u_{m,sim}$
3,635	3,748	1,031	1,00	0,5739686	0,1531				
4,297	4,229	0,984	1,00	0,61668	0,1458	135,19	139,42	148,2	0,984
4,952	4,706	0,950	1,00	0,6676868	0,1419	45,86	50,56	58	0,951
5,604	5,180	0,924	1,00	0,7251267	0,1400	32,25	37,43		
6,254	5,653	0,904	1,00	0,7875131	0,1393	27,08	32,74	35,4	0,9066
6,902	6,124	0,887	1,00	0,8537082	0,1394	24,57	30,69		
7,548	6,594	0,874	1,00	0,9228562	0,1400	23,23	29,82	29,3	0,869
8,193	7,063	0,862	1,00	0,9943162	0,1408	22,51	29,57	27,9	0,855
8,838	7,532	0,852	1,00	1,0676066	0,1417	22,15	29,69		
9,482	8,000	0,844	1,00	1,1423627	0,1428	22,04	30,04	30,25	0,843
10,125	8,468	0,836	1,00	1,2183057	0,1439	22,09	30,55		
10,768	8,936	0,830	1,00	1,2952203	0,1449	22,25	31,18	31,4	0,829
11,411	9,403	0,824	1,00	1,3729382	0,1460	22,49	31,90		
12,054	9,871	0,819	1,00	1,4513266	0,1470	22,80	32,67	31,6	0,813
12,696	10,338	0,814	1,00	1,5302795	0,1480	23,16	33,50		
13,34	10,80	0,81	1,00	1,6097117	0,15	23,56	34,36	34,2	0,808

Tabelle 27: Ergebnisgrößen bei $c_{a_Los_m} = 1$

Die berechneten und simulierten Werte sind wieder als Verlauf im folgenden Diagramm abgebildet:

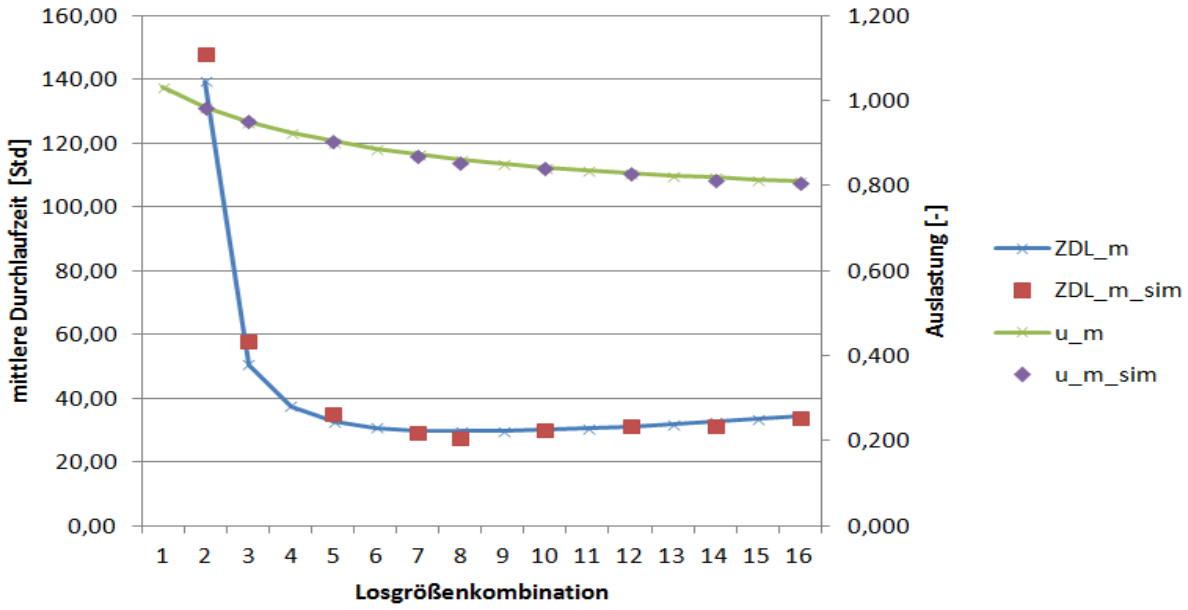


Abbildung 71: Variation aller Losgrößen, $c_{a_Los_m}$ = 1

Wieder ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten und simulierten Werte. Auch lässt sich erneut der Umstand erkennen, dass der durch viele kleine Lose und der damit verbundenen hohen Auslastung verursachte Stau in der Berechnung offensichtlich sogar etwas unterschätzt wird.

5.4.3.3 Zwischenankunftszeiten mit Variationskoeffizient $c_{a,Los,m}$ = 0,3

Nun soll der Variationskoeffizient der Loszwischenankunftszeiten auf den Wert 0,3 festgelegt werden. Dieser Wert wurde im Hinblick auf den im folgenden Exkurs erfolgenden Vergleich der beiden Modellansätze Warteschlangentheorie und Kennlinientheorie gewählt. Die folgende Tabelle zeigt die rechnerischen sowie simulierten Ergebnisse, das darauffolgende Diagramm fasst die Ergebnisse erneut anschaulich zusammen:

								$c_{a,Los,m}$ = 0,3			
$t_{a,Los,m}$	$t_{e,Los,m}$	u_m	$c_{a,Los,m}$	$\sigma_{eLos,m}$	$ce_{,Los,m}$	ZW_m	ZDL_m	α	β	$ZDL_{m,sim}$	$u_{m,sim}$
3,635	3,748	1,031	0,30	0,5739686	0,1531						
4,297	4,229	0,984	0,30	0,61668	0,1458	14,73	18,96	11,11	1392,14	19,1	0,986
4,952	4,706	0,950	0,30	0,6676868	0,1419	4,95	9,66	11,11	1604,57	9,53	0,951
5,604	5,180	0,924	0,30	0,7251267	0,1400	3,47	8,65	11,11	1815,82		
6,254	5,653	0,904	0,30	0,7875131	0,1393	2,91	8,56	11,11	2026,27	8,41	0,9066
6,902	6,124	0,887	0,30	0,8537082	0,1394	2,64	8,76	11,11	2236,13		
7,548	6,594	0,874	0,30	0,9228562	0,1400	2,50	9,09	11,11	2445,55	8,6	0,872
8,193	7,063	0,862	0,30	0,9943162	0,1408	2,42	9,49	11,11	2654,66	9	0,8645
8,838	7,532	0,852	0,30	1,0676066	0,1417	2,39	9,92	11,11	2863,50		
9,482	8,000	0,844	0,30	1,1423627	0,1428	2,38	10,38	11,11	3072,15	9,76	0,845
10,125	8,468	0,836	0,30	1,2183057	0,1439	2,40	10,86	11,11	3280,62		
10,768	8,936	0,830	0,30	1,2952203	0,1449	2,42	11,35	11,11	3488,97	10,6	0,829
11,411	9,403	0,824	0,30	1,3729382	0,1460	2,45	11,85	11,11	3697,20		
12,054	9,871	0,819	0,30	1,4513266	0,1470	2,49	12,36	11,11	3905,34	11,6	0,82
12,696	10,338	0,814	0,30	1,5302795	0,1480	2,54	12,87	11,11	4113,40		
13,34	10,80	0,81	0,30	1,6097117	0,15	2,59	13,39	11,11	4321,39	12,65	0,814

Tabelle 28: Ergebnisgrößen bei $c_{a,Los,m}$=0,3

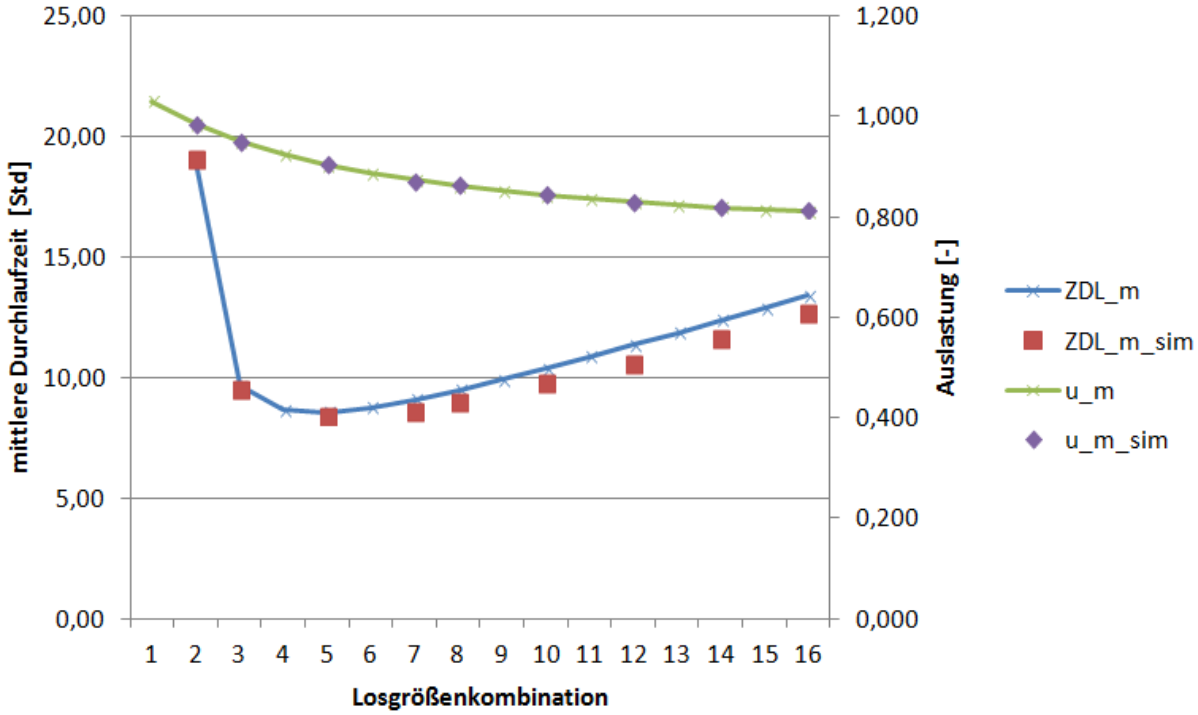


Abbildung 72: Variation aller Losgrößen bei $c_{a,Los,m}$ = 0,3

Es lässt sich wieder eine recht gute Übereinstimmung der berechneten und der simulierten Verläufe beobachten. Wie erwartet bewegen sich die Durchlaufzeitwerte auf einem weitaus niedrigeren Niveau als bei exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten. Dies ist alleine durch die kürzeren Wartezeiten vor der Station durch regelmäßigere Ankünfte zu erklären (die Auslastung nimmt dieselben Werte an wie im vorigen Abschnitt). Das Minimum der Durchlaufzeit liegt bei etwas niedrigeren Losgrößen als vorhin und ist auch stärker ausgeprägt, was bedeutet, dass durch die geringere Streuung im Auftragszugang eine gleichmäßigere Abfertigung der Werkstücke garantiert ist und daher nun etwas kleinere Losgrößen zu bevorzugen sind. Der sonstige Verlauf ist jenem aus Abbildung 71 sehr ähnlich.

5.4.4 gegenläufige Variation der Losgrößen

An dieser Stelle soll kurz der in Abschnitt 4.4.1 erwähnte Substitutionseffekt im Produktmix betrachtet werden. Im aktuellen Beispiel wurden hierzu die Losgrößen von A und C gegenläufig variiert, während die Losgröße von B unverändert blieb. Die Schrittweite der Variation wurde dabei so gewählt, dass die Gesamtanzahl der produzierten Lose konstant bleibt. Tabelle 29 zeigt die Vorgehensweise:

Variation x A u C gegenläufig, AS 1														
A					B					C				
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]
20	15	300	26,67	8,73	25	10	250	40,00	9,00	16	25	400	16,00	5,00
19	16	304	25,33	8,35	25	10	250	40,00	9,00	17	24	408	17,00	5,25
18	17	306	24,00	7,96	25	10	250	40,00	9,00	18	23	414	18,00	5,50
17	18	306	22,67	7,57	25	10	250	40,00	9,00	19	22	418	19,00	5,75
16	19	304	21,33	7,19	25	10	250	40,00	9,00	20	21	420	20,00	6,00
15	20	300	20,00	6,80	25	10	250	40,00	9,00	20	20	400	20,00	6,00
15	21	315	20,00	6,80	25	10	250	40,00	9,00	22	19	418	22,00	6,50
14	22	308	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	23	18	414	23,00	6,75
14	23	322	18,67	6,41	25	10	250	40,00	9,00	24	17	408	24,00	7,00
13	24	312	17,33	6,03	25	10	250	40,00	9,00	25	16	400	25,00	7,25
12	25	300	16,00	5,64	25	10	250	40,00	9,00	27	15	405	27,00	7,75
12	26	312	16,00	5,64	25	10	250	40,00	9,00	29	14	406	29,00	8,25
12	27	324	16,00	5,64	25	10	250	40,00	9,00	31	13	403	31,00	8,75
11	28	308	14,67	5,25	25	10	250	40,00	9,00	35	12	420	35,00	9,75
11	29	319	14,67	5,25	25	10	250	40,00	9,00	37	11	407	37,00	10,25
10	30	300	13,33	4,87	25	10	250	40,00	9,00	40	10	400	40,00	11,00

Tabelle 29: gegenläufige Variation LG A und LG C

In Tabelle 30 sind die erzielten Ergebnisse für die mittlere Warte- und Durchlaufzeit aufgelistet:

$t_{a,Los,m}$	$t_{e,Los,m}$	u_m	$c_{a,Los,m}$	$\sigma_{eLos,m}$	$ce_{,Los,m}$	ZW_m	ZDL_m
8,000	6,920	0,865	0,30	1,9222398	0,2778	3,71	10,63
8,110	7,002	0,863	0,30	1,6890164	0,2412	3,28	10,28
8,182	7,055	0,862	0,30	1,4670217	0,2080	2,94	10,00
8,214	7,078	0,862	0,30	1,2688028	0,1793	2,69	9,77
8,205	7,072	0,862	0,30	1,1131133	0,1574	2,53	9,60
8,000	6,920	0,865	0,30	1,099816	0,1589	2,56	9,48
8,302	7,143	0,860	0,30	0,9594558	0,1343	2,38	9,52
8,193	7,063	0,862	0,30	0,9943162	0,1408	2,42	9,49
8,317	7,154	0,860	0,30	0,9803787	0,1370	2,40	9,55
8,150	7,031	0,863	0,30	1,1313156	0,1609	2,56	9,59
8,030	6,942	0,865	0,30	1,37662	0,1983	2,86	9,81
8,198	7,066	0,862	0,30	1,484819	0,2101	2,96	10,03
8,350	7,179	0,860	0,30	1,6102988	0,2243	3,09	10,27
8,213	7,078	0,862	0,30	2,0732426	0,2929	3,88	10,96
8,319	7,156	0,860	0,30	2,2164648	0,3097	4,09	11,25
8,000	6,920	0,865	0,30	2,5931033	0,375	5,11	12,03

Tabelle 30: Substitutionseffekt Produktmix

Das folgende Diagramm zeigt die Verläufe von Durchlaufzeit und Auslastung für die gewählten Losgrößenkombinationen (Indizes 1 bis 16):

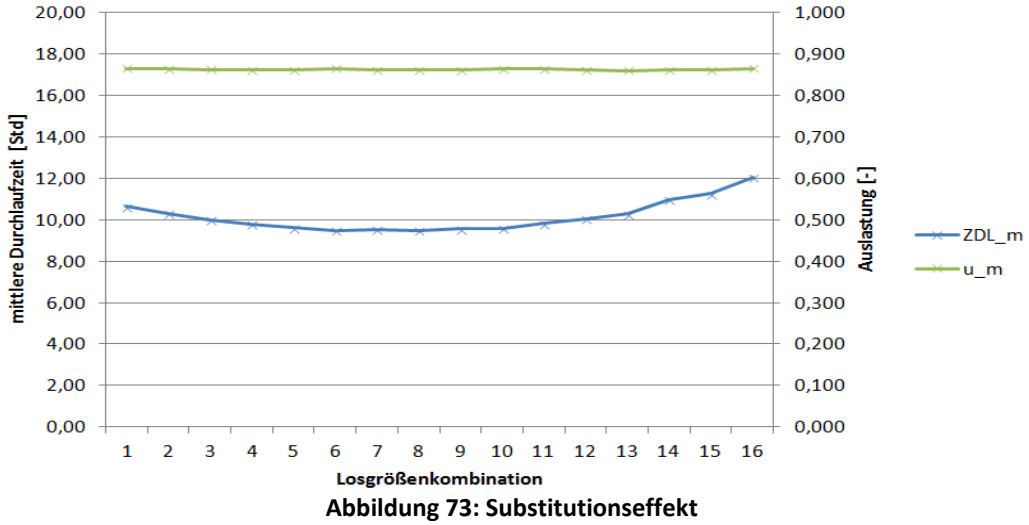


Abbildung 73: Substitutionseffekt

Man erkennt, dass die mittlere Durchlaufzeit durch die gegenläufige Variation der beiden Produktlosgrößen in einem relativ breiten Bereich ziemlich konstant bleibt. So ergibt sich beispielsweise für die Kombination (13,25,25) eine Durchlaufzeit von 9,59 Stunden, die Kombination (16,25,20) ergibt eine Durchlaufzeit von 9,6 Stunden. Der Unterschied beträgt also gerade 6 Minuten oder etwas über 1%. Dies ist hauptsächlich der gleichbleibenden Auslastung der Station zuzuschreiben. Nur bei sehr vielen Losen von Produkt A (30) bzw. Produkt C (25) lässt sich ein Anstieg der Wartezeiten durch die häufigen Rüstvorgänge für dieses Produkt feststellen.

5.4.5 Exkurs: Darstellung der Produktionskennlinie

In diesem Abschnitt sollen die in Kapitel 2.4 vorgestellten Vorgehensweisen zur Erstellung von Produktionskennlinien angewandt werden. Damit soll überprüft werden, wie genau die verschiedenen Modellierungsansätze die tatsächlichen Verläufe annähern. Es wird also im Prinzip deren Eignung als Instrument zur produktionslogistischen Positionierung überprüft.

5.4.5.1 Ermittlung der Kennlinie mithilfe der Warteschlangentheorie

Mit Little´s Gesetz lässt sich die mittlere Anzahl an Aufträgen für die verschiedenen Losgrößen am betrachteten Arbeitsplatz bestimmen. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die in Kapitel 2.3.5 erwähnten Kunden Aufträge und im vorliegenden Fall Lose sind. Daher ist auch die Ankunftsrate der Lose sowie die mittlere Durchlaufzeit der Lose an dieser Stelle einzusetzen.

$$N_{S,split} = r_{a,Los} * DLZ_{split,Los}$$

bzw.

$$N_{S,nonsplit} = r_{a,Los} * DLZ_{nonsplit,Los}$$

Für den Vergleich mit den Ergebnissen der Kennlinientheorie ist nur der "nonsplit"- Fall interessant, da sich die Kennlinientheorie nur auf Arbeitsvorgangsebene bewegt und eine Aufteilung des Fertigungsloses in dieser Betrachtung nicht gestattet ist. Da mit den Produktionskennlinien Zusammenhänge ausgehend von den Grundgrößen Auftragszeit und maximaler Leistung betrachtet werden (welche für den Betrachtungsfall als konstant angenommen werden), wird an dieser Stelle eine Losgröße für jedes der drei Produkte A, B und C gewählt, für welche die erforderlichen Parameter für die Anwendung der Kennlinientheorie im nächsten Abschnitt ermittelt wird. Die folgende Tabelle zeigt die betrachteten Auftragsdaten:

Auftrag	P [Std]	Bedarf [Stk]	t_e [Std]	t_r [Std]	L_{max} [Std/BKT]	x	Anz.Lose	Durchsatz
A	400	300	0,38667	1	16	14	22	308
B		250	0,3	1,5		25	10	250
C		400	0,25	1		23	18	414

Tabelle 31: Auftragsdaten Beispiel 2

Nun kann für diese Losgrößen (Auftragszeiten) die Auslastung variiert werden. In der Warteschlangentheorie ist dies gleichbedeutend mit der Verringerung bzw. Vergrößerung der Ankunftsintervalle und damit des Durchsatzes an der Station. Für ein Auslastungsspektrum von 0 - 100% (genauer 99,9999%, da das Warteschlangenmodell bei Vollauslastung keine vernünftigen Werte mehr liefert) werden in Folge die durchschnittliche Anzahl an Kunden (Aufträgen), welche sich im System befinden, sowie die Zeitgrößen ermittelt. Dies erfolgt für das gewählte G|G|1 Modell mithilfe der Gleichungen (3.18), (3.19) und (3.26). Das folgende Diagramm zeigt die errechneten Verläufe der mittleren Durchlaufzeit für die drei in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Fälle:

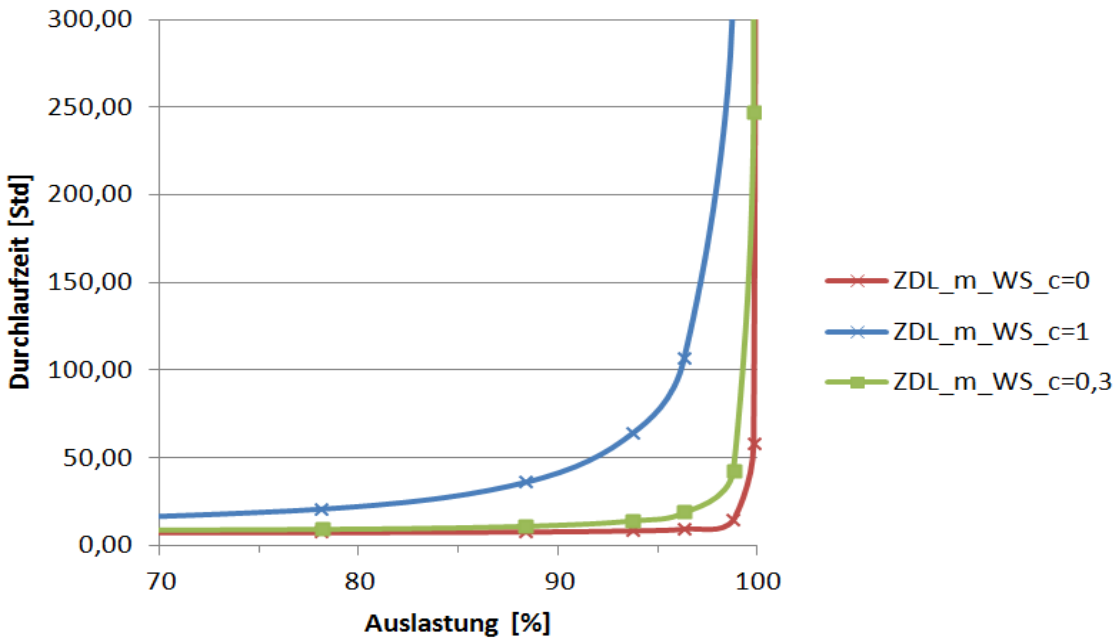


Abbildung 74: mittlere Durchlaufzeit mit Warteschlangentheorie

Wie erwartet beeinflusst die Varianz der Ankunftszeiten die Durchlaufzeit der Lose erheblich. Während bei konstanten Ankunftsintervallen ($c_{a,Los,m}$ = 0) das Arbeitssystem bis zu ca. 95 % ausgelastet werden kann, ohne dabei mit nennenswerten Durchlaufzeiterhöhungen rechnen zu müssen, erhöht sich bei exponentialverteilten Ankunftszeiten die Durchlaufzeit an diesem Punkt gegenüber dem niedrig ausgelasteten Bereich bereits um ca. das Zehnfache.

Für den Fall $c_{a,Los,m}$ = 0,3 sind in Tabelle 32 die Ergebnisse der Rechenschritte aufgelistet:

A_m=u*100	L_m (t)	BA_m [1]	FG_m	ZDL_m [BKT]	ZDL_m [Std]	ZUE_m [BKT]	ZUE_m [Std]	B_m [Std]
12,06	1,93	0,1216	1,01	0,47	7,45	0,00	0,06	0,92
20,67	3,31	0,2097	1,01	0,47	7,50	0,01	0,11	1,59
34,39	5,50	0,3542	1,03	0,48	7,61	0,01	0,22	2,68
54,31	8,69	0,5799	1,07	0,49	7,89	0,03	0,50	4,38
78,14	12,50	0,9408	1,20	0,56	8,90	0,09	1,51	7,09
88,38	14,14	1,2676	1,43	0,66	10,60	0,20	3,21	9,52
93,75	15,00	1,7402	1,86	0,86	13,71	0,40	6,33	13,02
96,33	15,41	2,4070	2,50	1,15	18,46	0,69	11,07	17,95
98,80	15,81	5,6147	5,68	2,62	41,99	2,16	34,60	41,66
99,82	15,97	33,3745	33,43	15,44	247,00	14,98	239,61	246,74
99,99	16,00	1078,5875	1078,64	498,05	7968,80	497,59	7961,42	7968,56
100,00	16,00	5708,7486	5708,81	2635,97	42175,48	2635,51	42168,09	42175,23

Tabelle 32: Daten zur Erstellung der Produktionskennlinie mit $c_{a_Los_m}$=0,3

Aus diesen Daten lassen sich nun die Produktionskennlinien in ihrer "klassischen Form" darstellen:

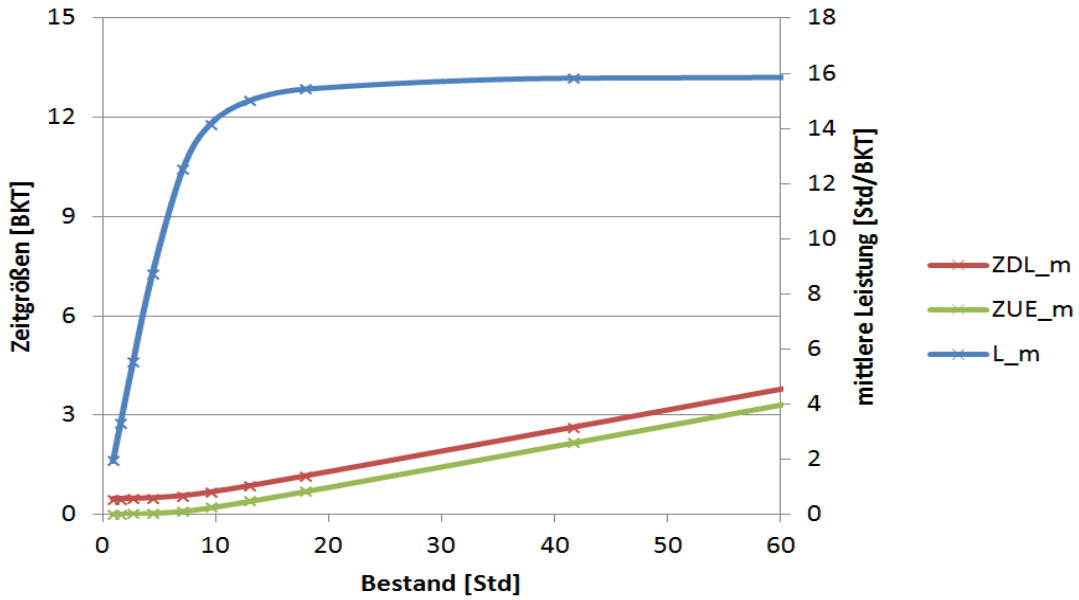


Abbildung 75: Produktionskennlinien mittels WS für $c_{a_Los_m}$ = 0,3

Diese Darstellung zeigt, dass für einen Betrieb an der Kapazitätsgrenze (16 Stunden pro BKT) ein Bestand von ca. 40 Arbeitsstunden am System gehalten werden müsste. Möchte man die Kapitalbindung durch hohe Bestände verringern, so muss man Auslastungsverluste hinnehmen, jedoch verkürzt sich dadurch auch die Durchlaufzeit. Eine Halbierung des mittleren Bestandes führt bspw. zu einem Auslastungsverlust von ca. 3%, die mittlere Durchlaufzeit lässt sich durch diese Maßnahme um fast 50% reduzieren.

5.4.5.2 Ermittlung der Produktionskennlinien mittels der Kennlinientechnik

Zum Vergleich der Ergebnisse aus der Warteschlangentheorie sollen nun für das obige einfache Beispiel die entsprechenden Kennlinien über die Trichterformel und die daraus

abgeleitete Kennlinientheorie ermittelt werden. Als Ausgangspunkt dienen wie bereits erwähnt die Auftragszeiten ZAU_i und die maximale Leistung L_{max} der Arbeitsstation. Für die Auftragszeit von Produkt A ergibt sich zum Beispiel:

$$ZAU_A = x_A * t_{e,A} + t_{r,A} = 6{,}413\ [Std]$$

Die maximale Leistung ist gleich der Tageskapazität TKAP, da in der Berechnung der effektiven Prozesszeiten bereits die Verfügbarkeit sowie allfällige Wartungsarbeiten einberechnet sind:

$$L_{max} = 16\ [Std/BKT]$$

Die Voraussetzungen für die Anwendung der Kennlinientheorie auf dieses Beispiel gemäß Abschnitt 2.4.1 können erfüllt werden, da zu jedem Zeitpunkt genau ein Auftrag bearbeitet wird (FIFO). Außerdem ist die Bearbeitungszeit eines jeden Auftrages kleiner ist als das zugehörige Ankunftsintervall, somit tritt in einer idealisierten Prozessvorstellung ohne Varianz der Ankunftszeiten keine Wartezeit auf. Der ideale Mindestbestand beträgt im vorliegenden Fall also

$$BI_{min} = ZAU_m * (1 + {ZAU_v}^2) = 7{,}566\ [Std]$$

Für die ideale Mindestreichweite ergibt sich

$$R_{min} = \frac{BI_{min}}{L_{max}} = \frac{7{,}566\ [Std]}{16\ [Std]} = 0{,}473\ [Std]$$

Nun erfolgt der Übergang zur realen Produktionsumgebung. Dafür wird gemäß Abschnitt 2.4.1 ein Streckfaktor α von 10 angenommen. Die mittlere Leistung des Systems ergibt sich gemäß Abschnitt 2.2.3 zu:

$$L_m = \frac{AB}{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n} ZAU_i}{P} = \frac{345{,}17\ [Std]}{25\ [BKT]} = 14{,}1\ [\frac{Std}{BKT}]$$

Anhand dieser Daten sowie mithilfe den Parametern α=10 und C=0,25 lässt sich nun der tatsächlich vorliegende mittlere Bestand an der Arbeitsstation ermitteln:

$$B_m(L_m) = BI_{min} * \frac{L_m}{L_{max}} + BI_{min} * \alpha * (1 - \sqrt[4]{1 - \frac{L_m}{L_{max}}})^4 = 8{,}877\ [Std]$$

Daraus ergibt sich auch die mittlere Reichweite des realen Systems:

$$R_m(t) = \frac{B_m(t)}{L_m(t)} = 0{,}629[BKT]$$

und schließlich die Durchlaufzeit (mit ZDF_m= 0,462 [BKT] und ZDF_v=0,155):

$$ZDL_m(t) = R_m(t) - ZDF_m * ZDF_v^2 = 0{,}624\ [BKT] = 9{,}99\ [Std]$$

Die errechneten Werte für den betrachteten Betriebspunkt sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Auftrag	ZAU_i [Std]	ZAU_m [Std]	ZAU_v	Bi_{min} [Std]	R_{min}	L_m [Std/BKT]	A_m=u*100
A	6,41338						
B	9	7,3877933	0,155426	7,5662621	0,4728914	14,103774	88,14859
C	6,75						

α	B_m [Std]	R_m [BKT]	ZDF_m [BKT]	ZDF_v	ZDL_m [BKT]	ZDL_m [Std]
10	8,8765059	0,629371	0,4617371	0,155426	0,6182167	9,8914664

Tabelle 33: ermittelte Daten für aktuellen Betriebspunkt

Anmerkung: *Da hier der von Nyhuis/Wiendahl vorgeschlagene Streckfaktor α = 10 verwendet wird, ergeben sich die Bestands- und Zeitgrößen gemäß der unteren Reihe in der obigen Tabelle. Ein Streckfaktor von 10 entspricht also in etwa einem Variationskoeffizienten des Ankunftsprozesses von 0,3. Einem exponentialverteilten Ankunftsverhalten der Lose entspricht in etwa ein Faktor von α = 120.*

Durch Manipulation der Auslastung (also Erhöhung bzw. Verringerung des Durchsatzes), welche in der Kennlinientechnik über die Variation der Laufvariablen t durchgeführt wird, lassen sich die Produktionslinien für die betrachtete Arbeitsstation darstellen. In der folgenden Tabelle ist diese Variation abgebildet:

t	L_m (t)	A_m (t)	B_m [Std]	R_m [BKT]	ZDL_m [BKT]	ZDL_m [Std]	ZUE_m [BKT]	ZUE_m [Std]	BA_m [1]
0,000001	1,93	12,06	0,91	0,47	0,46	7,39	0,00	0,00	0,12
0,00001	3,31	20,67	1,56	0,47	0,46	7,39	0,00	0,00	0,21
0,0001	5,50	34,39	2,61	0,47	0,46	7,41	0,00	0,02	0,34
0,001	8,69	54,31	4,18	0,48	0,47	7,53	0,01	0,14	0,55
0,01	12,50	78,14	6,67	0,53	0,52	8,36	0,06	0,97	0,88
0,03	14,14	88,38	8,96	0,63	0,62	9,96	0,16	2,57	1,19
0,0625	15,00	93,75	11,82	0,79	0,78	12,43	0,32	5,04	1,58
0,1	15,41	96,33	14,85	0,96	0,95	15,24	0,49	7,85	1,99
0,2	15,81	98,80	22,61	1,43	1,42	22,70	0,96	15,32	3,04
0,4	15,97	99,82	37,82	2,37	2,36	37,71	1,89	30,32	5,09
0,7	16,00	99,99	60,53	3,78	3,77	60,35	3,31	52,97	8,17
1	16,00	100,00	83,23	5,20	5,19	83,05	4,73	75,66	11,24

Tabelle 34: Daten zur Erstellung der Produktionskennlinie mit α = 10

Mit den erhaltenen Daten lassen sich die Produktionskennlinien nach der Kennlinientechnik darstellen:

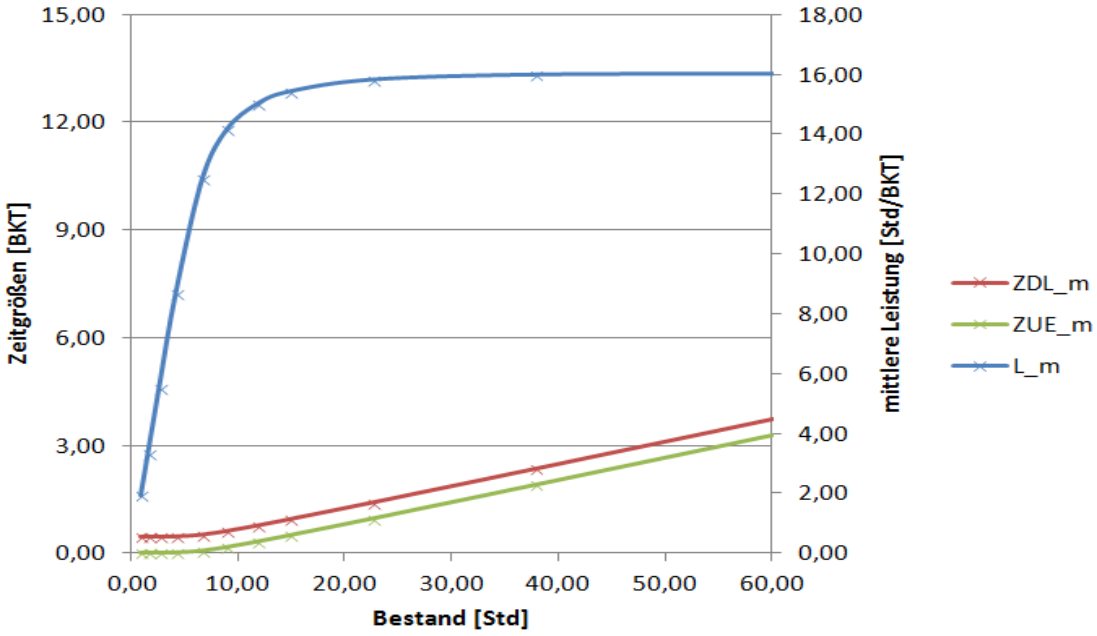


Abbildung 76: Produktionskennlinien mit $\alpha = 10$

Die Verläufe in Abbildung 76 ähneln jenen in Abbildung 75 sehr stark. Daher ist für den Vergleich der beiden Modellansätze eine Darstellung gemäß Abbildung 74 zweckmäßig. Es ergibt sich:

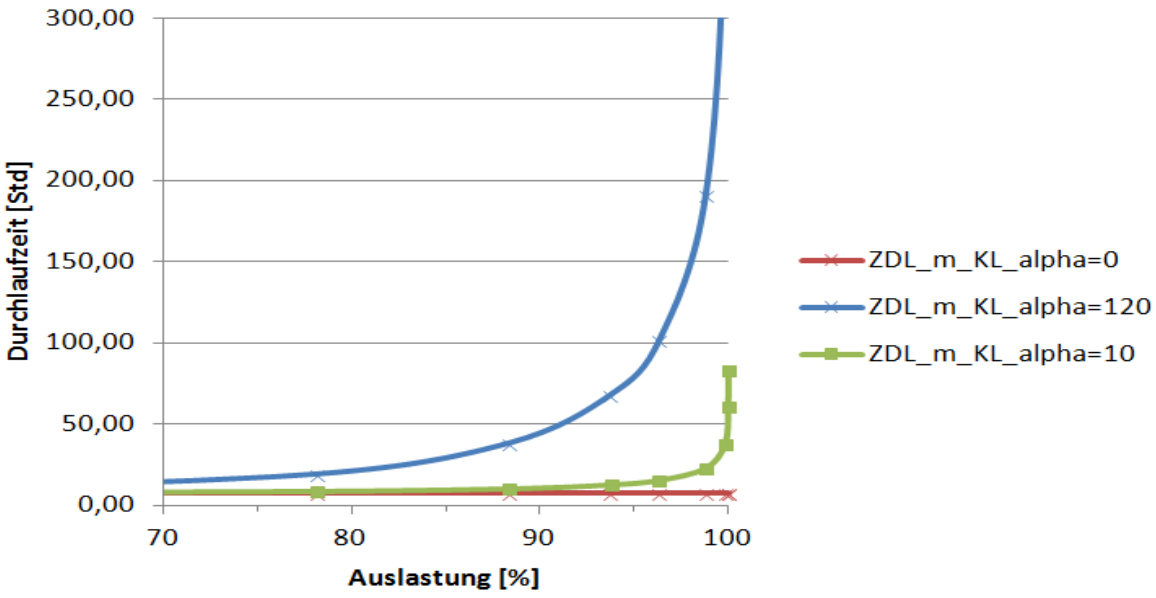


Abbildung 77: mittlere Durchlaufzeit mit Kennlinientheorie

Die mittels der Kennlinientechnik ermittelten Durchlaufzeitverläufe vermitteln nun ein etwas anderes Bild als jene in Abschnitt 5.4.5.1. Bei einem getakteten Ankunftsprozess ($c_{a,Los,m}$) bleibt die Durchlaufzeit bis 100% Auslastung konstant, es tritt also bis zur Vollauslastung des Systems kein Stau auf. In den mittels der Warteschlangentheorie ermittelten Kennlinien ist jedoch bereits ab einer Auslastung von 98% eine deutliche Erhöhung der mittleren

Durchlaufzeit erkennbar, was aufgrund der unterschiedlichen Arbeitsinhalte auch plausibel erscheint. Bei einem Streckfaktor von 120 verläuft die Kurve in Abbildung 77 ähnlich wie jene bei exponentialverteilten Ankunftszeiten in Abbildung 74. Jedoch verläuft sie bei hoher Auslastung wesentlich flacher als die mit der Warteschlangentheorie ermittelte.

5.4.5.3 Überprüfung der Produktionskennlinien mittels Simulationsläufen

Nun sollen mittels einiger Simulationsläufe die ermittelten Kennlinien aus den vorigen Abschnitten überprüft werden. Um die betrachteten Auslastungsgrade zu erreichen, wird im Modell die mittlere Ankunftsrate entsprechend angepasst. Es zeigten sich folgende Ergebnisse:

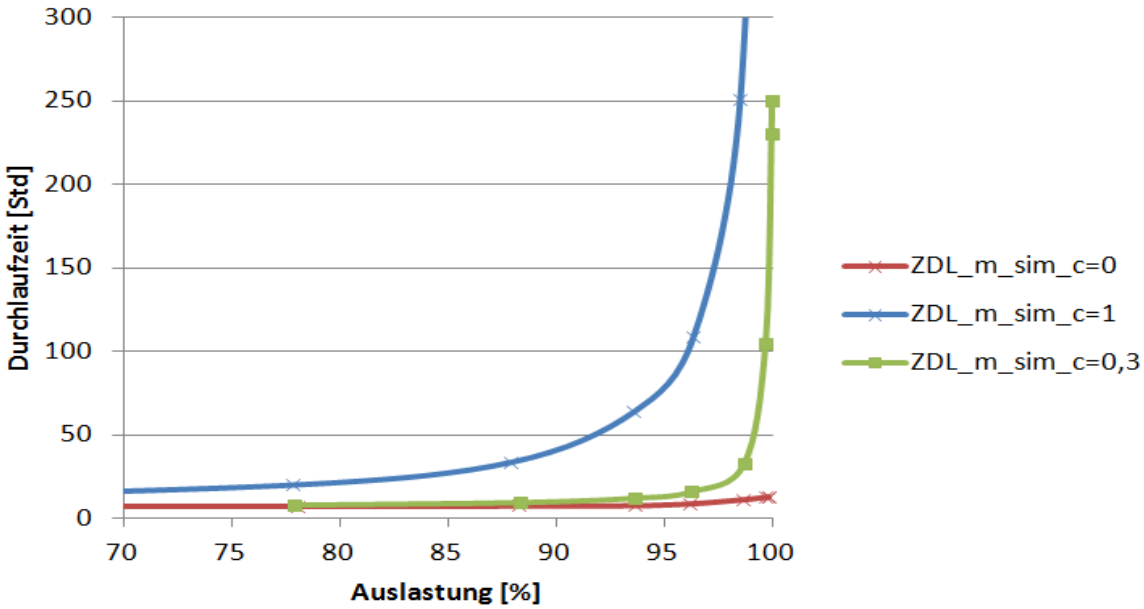


Abbildung 78: mittlere Durchlaufzeit mit Simulation

Die simulierten Kennlinien für varianzbehaftete Ankunftsintervalle zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Kennlinien in Abbildung 74. Lediglich im Falle deterministischer Ankünfte zeigen die Simulationsergebnisse im Gegensatz zum Warteschlangenmodell keinen wesentlichen Anstieg bei sehr hohen Auslastungsgraden. Es ist hier nur eine leichte Erhöhung der Durchlaufzeit zu beobachten. Nun kann ein Vergleich der mittels der drei unterschiedlichen Methoden ermittelten Kennlinien erfolgen. Dazu wurde die mittels der Kennlinientheorie ermittelte Durchlaufzeitkurve (α=10, C=0,25) dem Verlauf der mittels des Warteschlangenmodells ($c_{a,Los,m}$ = 0,3) errechneten Durchlaufzeit sowie den simulierten Werten gegenübergestellt (Ein entsprechendes Diagramm für exponentialverteilte Ankünfte findet sich im Anhang in Abbildung 97). Es ergibt sich folgende Grafik:

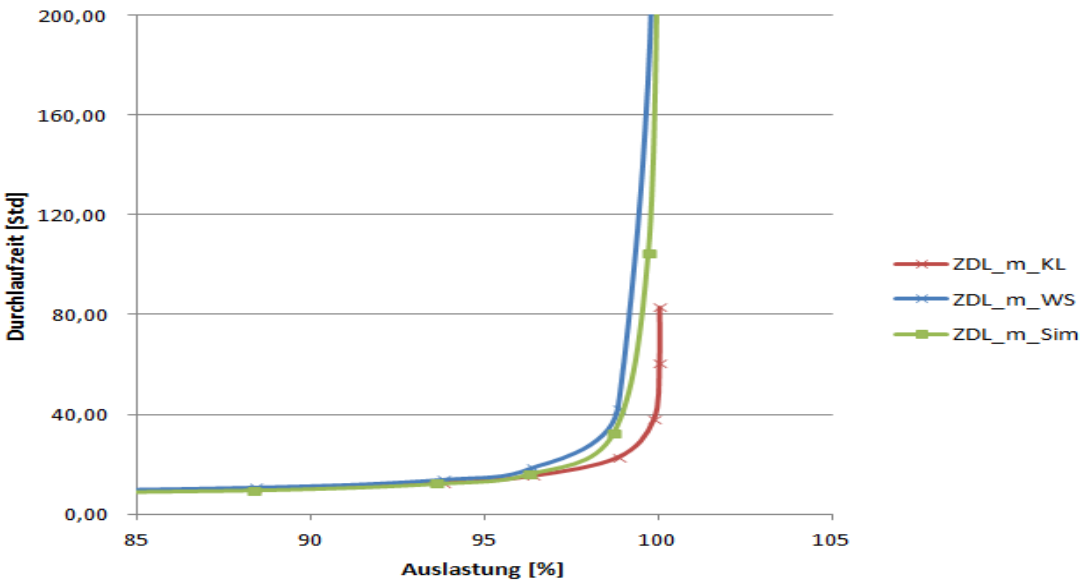


Abbildung 79: Gegenüberstellung der Ergebnisse

In Abbildung 79 wurde das Diagramm so skaliert, dass der für Fertigungsbetriebe interessante Bereich zwischen 85 und 100% Auslastung gut sichtbar dargestellt wird. Dabei zeigt sich, dass der simulierte Verlauf und der mithilfe des Warteschlangenmodells berechnete Verlauf einander sehr stark ähneln, während die Kennlinientheorie ab ca. 97% Auslastung deutlich geringere Durchlaufzeiten ergibt. Auch der sehr starke Anstieg der Durchlaufzeit im Grenzfall u --> 1 konnte durch die Simulationsläufe weitgehend bestätigt werden. Einer der wesentlichen Kritikpunkte an der Warteschlangentheorie besteht darin, dass sie keine Vollauslastung zulässt bzw. für diesen Fall keine Ergebnisse mehr liefert. Jedoch ergibt sich auch bei der Simulation im Falle von u = 1 kein stationärer Wert für ZDL. Die Kennlinientheorie ergibt bei u = 1 und mit dem gewählten Streckfaktor von 10 einen Wert von ca. 83 Stunden, sie suggeriert damit, dass eine höhere Durchlaufzeit (ablaufbedingt) nie auftritt. Jedoch konnten in den Simulationsläufen bereits ab einer Auslastung der Arbeitsstation von 96% Durchlaufzeiten von über 100 Stunden beobachtet werden.

Es stellt sich also die Frage, wodurch sich der mittels der Kennlinientheorie ermittelte Durchlaufzeitverlauf mit jenem aus der Simulation zur Deckung bringen lässt. Die Möglichkeiten bestehen in einer Anpassung des Streckfaktors α und des C_{Norm}- Wertes. Wählt man bspw. für α einen Wert von 20, so lässt sich eine wesentlich bessere Übereinstimmung mit den Simulationsdaten im Abknickbereich feststellen, siehe Abbildung 80:

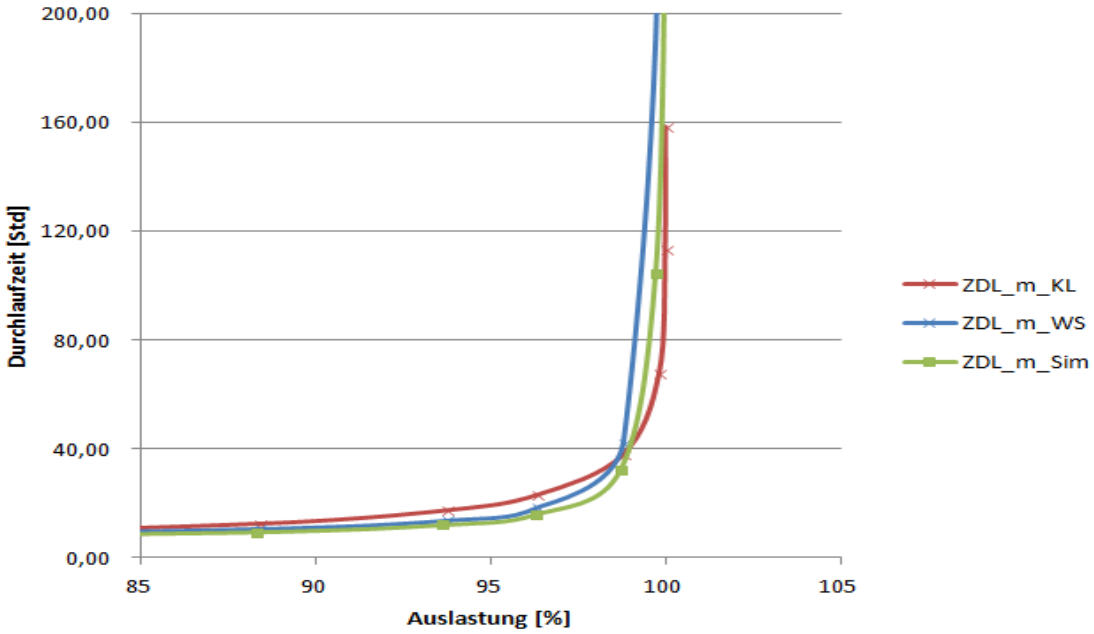


Abbildung 80: Gegenüberstellung mit alpha = 20

Jedoch "überschätzt" die neue Kennlinie die Durchlaufzeit im Bereich unter 98%, darüber tritt nach wie vor eine Unterschätzung auf. Das bedeutet, hier müsste noch eine Anpassung des C- Wertes, welcher für die Krümmung der Kennlinie verantwortlich ist, erfolgen. Dies ist aber aufgrund dessen mathematischer Natur vor allem a priori nicht möglich, es können hier nur Schätzungen vorgenommen werden. Die Warteschlangentheorie besitzt hingegen einen statistischen Hintergrund, die Verteilungsformen des Ankunfts- sowie des Bearbeitungsprozesses lassen sich über Stichproben ermitteln, sie bestimmen schließlich - zusammen mit der erzielten Auslastung - über den mittleren Bestand sowie die mittlere Durchlaufzeit an der Arbeitsstation.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass die Warteschlangentheorie auch in Bezug auf die Erstellung von Betriebskennlinien sehr gute Ergebnisse liefert (zumindest im Vergleich mit Simulationsläufen, mit Praxisdaten konnte in dieser Arbeit keine Überprüfung stattfinden). Bei der Anwendung der Kennlinientheorie erweist sich die Möglichkeit einer raschen Ermittlung der wesentlichen Zielgrößen als großer Vorteil, allerdings besitzt sie durch ihren mathematischen Hintergrund sowie die vorgenommenen "Schätzungen" sowie Zusammenfassungen der Variabilitätseinflüsse zum Streckfaktor α große Nachteile sowohl in der Genauigkeit wie auch in der Flexibilität. Hiermit bestätigt sich also die in der Theorie bereits geäußerte Kritik und erweist sich die Untersuchung mittels warteschlangentheoretischer Gleichungen als richtig.

5.5 Beispiel 3 - gleichartige Aufträge - mehrere Stationen

In diesem Beispiel soll nun der Schritt von der Behandlung einer einzelnen Arbeitsstation zur Beobachtung des Verhaltens einer Produktionslinie erfolgen. Ausgegangen wird hierbei zunächst wieder vom Ein - Produkt - Fall.

5.5.1 Rahmenbedingungen

Betrachtet wird eine aus fünf Arbeitsstationen bestehende Linie, welche von mehreren Produkten gleicher Auftragsdaten durchlaufen wird. Diese Definition ist wichtig, da von einem Rüstvorgang nach jedem Auftrag ausgegangen wird, auftragsabhängiges Rüsten also ausgeschlossen ist. Zur Berechnung reichen also die Auftragsdaten eines einzigen Produktes. In Tabelle 35 sind die Bearbeitungszeiten an jeder Station sowie die stationsspezifischen Rüstzeiten aufgelistet. Außerdem ist der Planungshorizont (25 BKT bei TKAP = 16 Std/BKT) und der Gesamtbedarf der Produkte gegeben.

	A		
AS\Auftrag	t_e [Std]	t_r [Std]	ce
1	0,3	1	0
2	0,35	1	0
3	0,1	2	0
4	0,15	1	0
5	0,2	1	0
t_a [Std]	0,40		
Planungszeitraum	400		
Bedarf	1000		

Tabelle 35: Auftragsdaten Produkt A

5.5.2 Berechnung der stationsspezifischen Größen

Mit den Eingangsdaten aus Tabelle 35 erhält man zunächst eine erforderliche Ankunftsrate, um den Bedarf im betrachteten Zeitraum zu decken. Nun erfolgt zunächst analog zu Abschnitt 5.4.2 die Berechnung einer "optimalen" Auslastung sowie einer zugehörigen Losgröße für jede Station:

u_0	u^x	$t_{r,m}$ [Std]	L
0,75	0,8660254	1	7,4641016
0,875	0,9354143	1	15,483315
0,25	0,5	2	4
0,375	0,6123724	1	2,5797959
0,5	0,7071068	1	3,4142136

Tabelle 36: Hilfsgrößen für stationsoptimale Losgrößen

$x^{x,1}$	21,55
$x^{x,2}$	41,38
$x^{x,3}$	20,00
$x^{x,4}$	10,53
$x^{x,5}$	12,07
x^{x}	31,46

Tabelle 37: stationsoptimale Losgröße

Es ergibt sich eine "optimale" Losgröße für jede der fünf Stationen. Bezeichnet sind diese mit $x^{x,1}$ bis $x^{x,4}$, x^{x} bildet den Mittelwert aus den optimalen Größen für Station 1 und 2. Im nächsten Schritt werden die Durchlaufzeiten für jede dieser Losgrößen ermittelt. Dazu werden zunächst die Durchlaufzeiten an jeder Station ermittelt und danach durch einfache Addition zur Auftragsdurchlaufzeit zusammengefasst.

Parameter AS 1											
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{e,Los}$ [Std]	$c_{e,Los}$	$t_{a,Los}$ [Std]	$c_{a,Los}$	u [1]	α	β	$t_{d,Los}$ [Std]	$c_{d,Los}$
22	46	1012	7,60	0,00	8,8	1,000	0,86	1,00	31680,00	8,8	0,5041153
41	25	1025	13,30	0,00	16,4	1,000	0,81	1,00	59040,00	16,4	0,58508
20	50	1000	7,00	0,00	8	1,000	0,88	1,00	28800,00	8	0,4841229
11	91	1001	4,30	0,00	4,4	1,000	0,98	1,00	15840,00	4,4	0,2119859
12	84	1008	4,60	0,00	4,8	1,000	0,96	1,00	17280,00	4,8	0,2856523
31	33	1023	10,30	0,00	12,4	1,000	0,83	1,00	44640,00	12,4	0,5568021

Tabelle 38: Parameter Arbeitsstation 1

Es wird ein externer Ankunftsprozess mit einem Variationskoeffizienten von 1 angenommen. Da nun aber weitere Stationen auf die erste folgen, pflanzt sich die Variabilität des Materialflusses gemäß Abschnitt 3.4.4 fort. Die Lose kommen also an der ersten Station in exponentialverteilten Abständen an, verlassen die Station aber aufgrund der varianzfreien Bearbeitungszeit mit einer geringeren Variabilität. Man erkennt außerdem, dass eine hohe Auslastung zu einer stärkeren Reduzierung des Variationskoeffizienten führt, was sich mit den Aussagen in Abschnitt 3.4.4 deckt. Die folgende Tabelle zeigt nun die Durchlaufzeit an Station 1 für die unterschiedlichen Losgrößen:

berechnete Kennzahlen AS 1					
ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$ZWL_{nonsplit}$ [Std	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$ZDL_{nonsplit}$ [Std]
24,07	3,15	6,30		28,52	31,67
28,53	6,00	12,00		35,83	41,83
24,50	2,85	5,70		28,65	31,50
92,45	1,50	3,00		95,25	96,75
52,90	1,65	3,30		55,85	57,50
25,26	4,50	9,00		31,06	35,56

Tabelle 39: Zeitgrößen für Station 1

Für die folgenden Arbeitsstationen verfährt man nun in derselben Weise wie bei Station 1. Die Ergebnisse der Durchrechnungen sind im Anhang in Tabelle 61 aufgelistet.

5.5.3 Dimensionierung am Engpass

Anhand der Ergebnisse in Tabelle 61 lässt sich erkennen, dass die für die Stationen 3, 4 und 5 durchlaufzeitoptimalen Losgrößen so klein sind, dass sie zu einer Überlastung der Station 2 führen. Somit sind diese Losgrößen, sofern man die Arbeitsstation 2 nicht mit einer zusätzlichen Maschine ausstattet, nicht geeignet. Übrig bleiben damit die Losgrößen 22 (von Arbeitsstation 1) und 41 (von Station 2). Die tatsächlich durchlaufzeitoptimale Losgröße wird sich also zwischen diesen beiden Werten ansiedeln. Hier bietet sich entweder das arithmetische Mittel oder auch eine Gewichtung mit den Auslastungsgraden der beiden Stationen an.

Generell lässt sich damit sagen, dass für die Losgrößenbestimmung nur hochausgelastete Maschinen infrage kommen, der bestimmende Faktor ist auch hier - übereinstimmend mit der in Abschnitt 2.3.1 erwähnten Theory of Constraints - der Engpass der Linie, welchen im vorliegenden Fall Arbeitsstation 2 darstellt. Die folgende Abbildung zeigt das Modell der Linie während eines Simulationslaufs, wo sich alleine anhand der Füllstände der Puffer die Stationen 1 und 2 leicht die Engpässe der Linie identifizieren lassen:

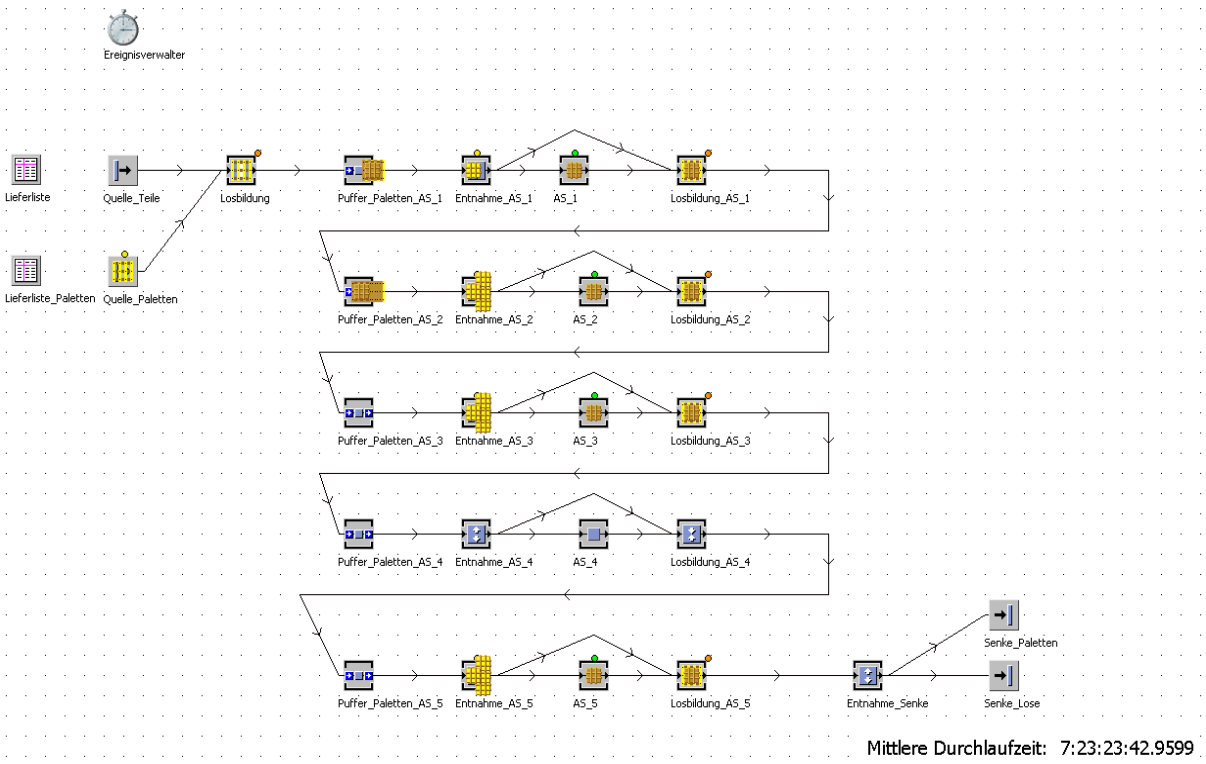


Abbildung 81: Produktionslinie

5.5.4 Berechnung der Auftragsdurchlaufzeit

Durch Summenbildung der Stationsdurchlaufzeiten gemäß Gleichung (2.13) ergibt sich die mittlere Auftragsdurchlaufzeit. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse für Losgröße 40 (der Rechengang findet sich im Anhang in den Tabellen 63), für Losgrößen zwischen 22 und 40 sind die Werte im darauffolgenden Diagramm dargestellt.

	Zeitgrößen [Std]					
	ZW	ZWL_{split}	$ZWL_{nonsplit}$	ZWLB	ZDL_{split}	$ZDL_{nonsplit}$
AS 1	28,17	5,85	11,70		35,32	41,17
AS 2	38,23	6,83	13,65		46,41	53,23
AS 3	0,07	1,95	3,90		4,12	6,07
AS 4	0,10	2,93	5,85		4,17	7,10
AS 5	0,17	3,90	7,80		5,27	9,17
Gesamt						116,73

Tabelle 40: Auftragsdurchlaufzeit für LG 40

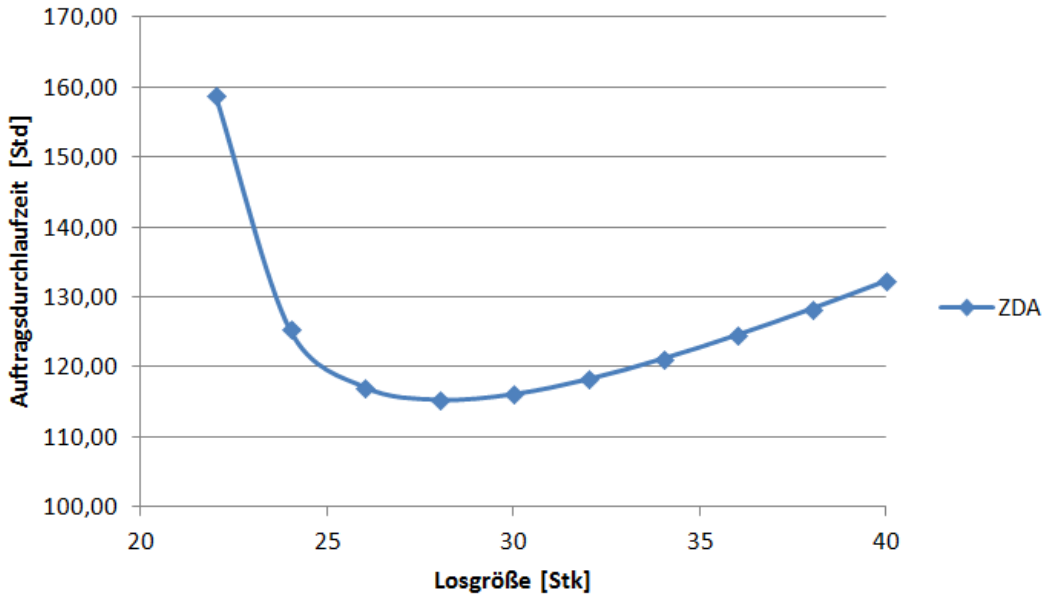


Abbildung 82: Auftragsdurchlaufzeitverlauf bei verschiedenen Losgrößen

Abbildung 82 zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Durchlaufzeitverläufe für eine einzelne Arbeitsstation (vergleiche Abbildung 67). Dies findet seine Erklärung in der Tatsache, dass für die Auftragsdurchlaufzeit vor allem die Durchlaufzeiten an Station 1 und 2 verantwortlich sind. Der Mittelwert der für diese beiden Stationen "optimalen" Losgröße ergibt sich zu ca. 30 Stück, was auch in etwa den optimalen Wert für die Linie darstellt.

5.5.5 Überlappung

Anhand des vorliegenden Beispiels soll kurz der in Abschnitt 4.5.3 diskutierte Effekt einer Überlappung von Arbeitsvorgängen veranschaulicht werden. Dazu soll von einer Fertigungslosgröße von 40 Stück ausgegangen werden. Wird diese Losgröße in einer geschlossenen Produktionsweise gefertigt, findet also keine Überlappung der Arbeitsschritte statt, ergeben sich die Durchlaufzeiten an den fünf Arbeitsstationen und in Folge die Auftragsdurchlaufzeit gemäß Tabelle 40. Dabei erkennt man, dass die Durchlaufzeiten an den Stationen 1 und 2 bei weitem den größten Anteil an der Gesamtdurchlaufzeit ausmachen. Der Grund dafür ist im Wesentlichen die sehr hohe Auslastung der Station 2 (Linienengpass) und die hohe Variabilität des Ankunftsprozesses bei relativ hoher Auslastung an Station 1. Dadurch kommt es an diesen beiden Stationen zu großen Wartezeiten. Abbildung 83 zeigt die Anteile der einzelnen Stationen an der Auftragsdurchlaufzeit sowie deren kumulierter Verlauf:

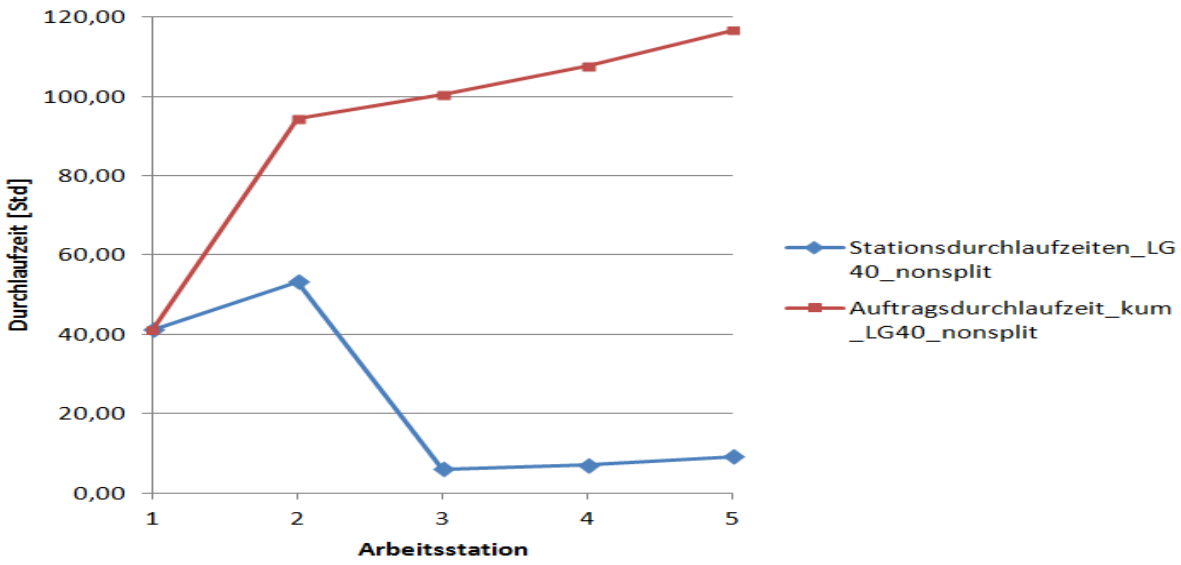


Abbildung 83: Durchlaufzeitanteile

Zu Anschaulichkeitszwecken wird in Folge der Fall varianzfreier Ankünfte betrachtet. Dadurch liegen die Durchlaufzeitwerte natürlich auf einem wesentlich niedrigeren Niveau, jedoch bilden nach wie vor die Durchlaufzeiten an Station 1 und 2 die größten Anteile an der Gesamtdurchlaufzeit, siehe Tabelle 41:

	Zeitgrößen [Std]					
	ZW	ZWL_{split}	$ZWL_{nonsplit}$	ZWLB	ZDL_{split}	$ZDL_{nonsplit}$
AS 1	0,00	5,85	11,70		7,15	13,00
AS 2	0,00	6,83	13,65		8,18	15,00
AS 3	0,00	1,95	3,90		4,05	6,00
AS 4	0,00	2,93	5,85		4,08	7,00
AS 5	0,00	3,90	7,80		5,10	9,00
Gesamt						50,00

Tabelle 41: Durchlaufzeiten bei $c_{a,Los,m}$=0

Lässt man nun an Station 1 eine Aufteilung des Fertigungsloses auf 2 Teillose zu je 20 Stück zu, welche in dieser Größe an Station 2 weitertransportiert werden, so verringern sich dadurch die Durchlaufzeiten an den Stationen 1 bis 5 gemäß den Gleichungen (4.44) und (4.47) zu folgenden Werten:

Station	ZDL
AS 1	10,00
AS 2	8,5
AS 3	1,5
AS 4	4,5
AS 5	5,5
Gesamt	30,00

Tabelle 42: Durchlaufzeiten bei Losteilung an AS 2

Das folgende Diagramm zeigt den erzielten Effekt im Vergleich zum Ausgangsfall. Dabei beschreibt der Index "geschlossen" eine Fertigung ohne Teilung der Prozesslose, "offen" bezeichnet den Überlappungsfall:

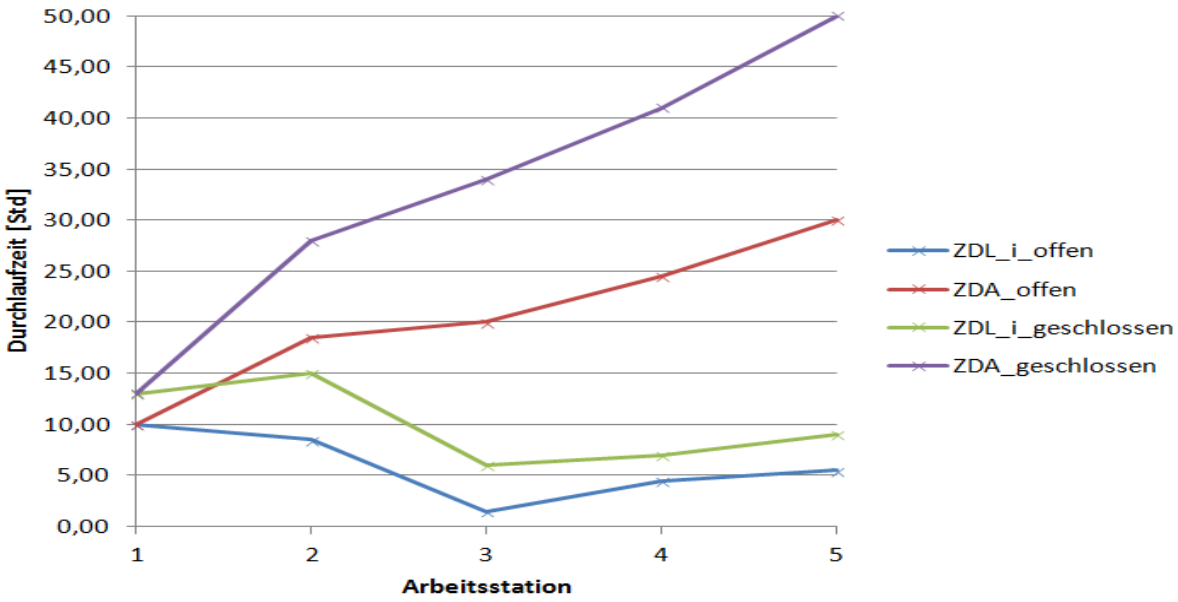


Tabelle 43: Durchlaufzeitverkürzung durch Losteilung

Durch diese einfache Maßnahme kann die mittlere Auftragsdurchlaufzeit der Linie also auf 60% des Ausgangsfalles reduziert werden. Allerdings sind wie bereits erwähnt doppelt so viele Transportvorgänge notwendig, daher ist hier der administrative und dispositive Aufwand in die Bewertung mit einzubeziehen.

5.6 Beispiel 4 - mehrere Produkte - mehrere Stationen

Nun sollen die Erkenntnisse der vorangegangenen Beispiele in einer allgemeinen Werkstattumgebung eingesetzt werden. Das Beispiel stellt also eine Kombination der Beispiele 2 und 3 dar, die dort diskutierten Effekte gelten hier also analog.

5.6.1 Rahmenbedingungen

Es wird eine Produktion mit 5 Produkten und 5 Arbeitsstationen angenommen (5x5). Die Produkte verfügen über verschiedene Bedarfe im Betrachtungszeitraum sowie unterschiedliche Bearbeitungs- und Rüstzeiten an den Stationen. Jedes Produkt durchläuft dieselbe Route (1-2-3-4-5). Jede Arbeitsstation besteht aus einer Maschine, welche im Zweischichtbetrieb betrieben wird, die Tageskapazität (TKAP) beträgt also 16 Std/BKT. Weiters wird angenommen, dass die leistungsmindernden Einflüsse von Maschinenausfällen und Wartungsarbeiten bereits in den Bearbeitungszeiten berücksichtigt wurden (zur Berechnung siehe Abschnitte 3.4.2.2, 3.4.2.3 und 3.4.2.5). Es wird im Weiteren davon ausgegangen, dass die angelieferten Paletten an der ersten Arbeitsstation in exponentialverteilten Abständen ankommen ($c_{a,Los,m} = 1$).

5.6.2 Eingangsdaten

Die folgende Tabelle zeigt die Bearbeitungs- und Rüstzeiten der Produkte an den Stationen:

	A		B		C		D		E	
AS\Auftrag	t_e [Std]	t_r [Std]	t_e [Std]	t_r [Std]	t_e [Std]	t_r [Std]	t_e [Std]	t_r [Std]	t_e [Std]	t_r [Std]
1	0,05	1,5	0,02	1,5	0,1	1,5	0,15	1,5	0,1	1,5
2	0,04	1,5	0,07	1,5	0,1	1,5	0,07	1,5	0,2	1,5
3	0,025	1	0,04	1	0,05	1	0,25	1	0,05	1
4	0,01	0,5	0,01	0,5	0,1	0,5	0,3	0,5	0,01	0,5
5	0,02	0,5	0,02	0,5	0,2	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5

Tabelle 44: Bearbeitungs- und Rüstzeitmatrix

Weiters werden die Bedarfe, der Betrachtungszeitraum sowie die sich daraus ergebenden Ankunftsraten (= erforderlichen Durchsatzraten) der einzelnen Produkte als Eingangsdaten benötigt:

	A	B	C	D	E
t_a [Std]	0,32	0,32	0,64	0,73	0,80
Planungszeit	320	320	320	320	320
Bedarf	1000	1000	500	440	400

Tabelle 45: Bedarfe

Aus diesen Daten ergibt sich gemäß (2.18) in Verbindung mit (4.21) bzw. gemäß (2.15) - wobei der Durchsatz hier dem Kehrwert der mittleren Leistung entspricht - ein erforderlicher Durchsatz von 10, 4375 Teilen pro Stunde. Dies ist vor allem in Hinblick auf die Simulation

wichtig, da ein stationärer Zustand genau dann erreicht ist, wenn dieser Durchsatz erreicht ist. Das Beispiel wurde wieder in Plant Simulation zur Überprüfung mittels Simulationsergebnissen konstruiert. Die folgende Abbildung zeigt das Modell während eines Simulationslaufs:

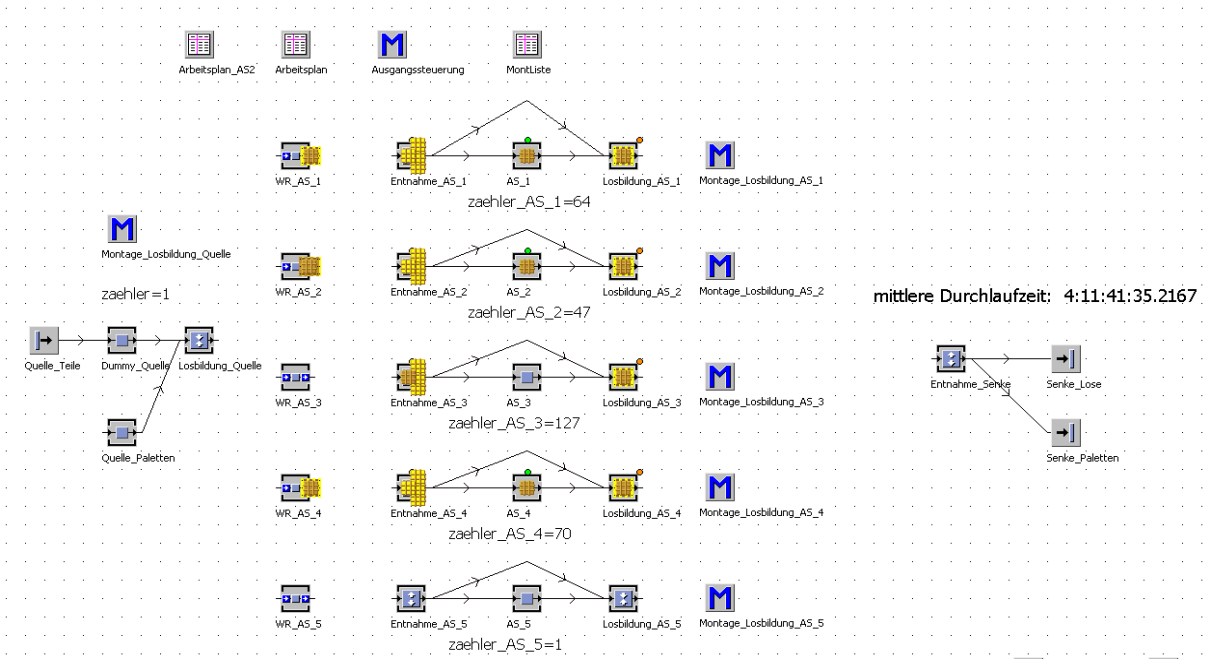


Abbildung 84: 5x5 Produktion

Der Materialfluss wird hier mittels mehrerer Methoden gesteuert. Sie bestimmen zum einen die Bearbeitungsreihenfolge der Produkte, außerdem steuern sie die Losbildungsstationen, welche die Losgrößen zwischen den Arbeitsstationen, also im Prinzip die Transportlosgröße bilden. Hier wurde eine geschlossene Produktion vorausgesetzt, was bedeutet, dass sich die Losgröße der Produkte über die Arbeitsstationen hinweg nicht verändert.

5.6.3 Bestimmung der Losgrößen

Analog zu Beispiel 2 werden nun über die Methode der optimalen Auslastung (Abschnitt 0) die durchlaufzeitoptimalen Losgrößen für jede der fünf Stationen näherungsweise ermittelt. Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse:

Station	u_0	u^x	$t_{r,m}$ [Std]	L
1	0,706	0,840	1,5	9,398
2	0,846	0,920	1,5	18,731
3	0,609	0,781	1	5,015
4	0,644	0,802	0,5	2,530
5	0,569	0,754	0,5	2,034

Tabelle 46: optimale Auslastungen

	A	B	C	D	E
$x^{x,1}$	157,95	394,89	78,98	52,65	78,98
$x^{x,2}$	430,77	246,16	172,31	246,16	86,15
$x^{x,3}$	160,58	100,37	80,29	16,06	80,29
$x^{x,4}$	202,96	202,96	20,30	6,77	202,96
$x^{x,5}$	76,69	76,69	7,67	30,68	30,68

Tabelle 47: optimale Losgrößen je Arbeitsstation

Wie man sieht, ergeben sich zur Erreichung eines Durchlaufzeitminimums an den jeweiligen Stationen sehr unterschiedliche Losgrößen. Somit soll zunächst überprüft werden, welche Kombination das beste Ergebnis über die gesamte Linie ergibt. Die Ergebnisse sind im Anhang in Tabelle 62 dargestellt.

Man erkennt, dass die für AS 4 und AS 5 optimalen Losgrößenkombinationen bereits an der Station 1 zu einer Überlastung der Station ($u_m > 1$) führen. Somit scheiden diese bereits an dieser Stelle aus. Die für Station 3 ermittelte Kombination führt an AS 2 zu einer Überlastung, somit kann auch diese nicht verwendet werden. Übrig bleiben die ersten beiden Kombinationen, von denen die für AS 2 ermittelte Kombination über alle Stationen hinweg betrachtet zum besten Ergebnis für ZDA_m führt. Dies erscheint logisch, da AS 2 durch die Ankunftsraten und mittleren Bearbeitungszeiten die höchste Auslastung besitzt und daher den Engpass der Linie darstellt. Somit hat die Wahl der Losgrößen, analog zu Beispiel 2, an dieser Arbeitsstation die größte Auswirkung. Die folgenden Tabellen zeigen die Berechnung der Zeitgrößen für die an AS 2 ermittelte optimale Kombination:

	A			B			C			D			E		
	x [Stk]	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]
AS 1	500	160,00	26,50	250	80,00	6,50	167	106,88	18,20	220	160,00	34,50	80	64,00	9,50
AS 2	500	160,00	21,50	250	80,00	19,00	167	106,88	18,20	220	160,00	16,90	80	64,00	17,50
AS 3	500	160,00	13,50	250	80,00	11,00	167	106,88	9,35	220	160,00	56,00	80	64,00	5,00
AS 4	500	160,00	5,50	250	80,00	3,00	167	106,88	17,20	220	160,00	66,50	80	64,00	1,30
AS 5	500	160,00	10,50	250	80,00	5,50	167	106,88	33,90	220	160,00	11,50	80	64,00	4,50

Tabelle 48: optimale Losgrößenkombination AS 2

	$t_{a,Los,m}$	$t_{e,Los,m}$	u_m	$c_{a,Los,m}$	$c_{e,Los,m}$	ZW_m	ZDL_m	ZDA_m
AS 1	20,0075	15,63	0,78	1,00	0,62	38,54	54,18	54,18
AS 2	20,0075	18,43	0,92	0,79	0,07	67,65	86,08	140,26
AS 3	20,0075	14,76	0,74	0,31	1,08	26,00	40,76	181,02
AS 4	20,0075	13,38	0,67	0,82	1,56	41,98	55,36	236,38
AS 5	20,0075	11,88	0,59	1,21	0,92	19,96	31,84	268,22

Tabelle 49: Ergebnisse für LG_opt_AS 2

Das folgende Diagramm zeigt die Anteile der Stationsdurchlaufzeiten an der Gesamtdurchlaufzeit. Zum Vergleich ist auch der Verlauf für die zweite mögliche Kombination (optimal für AS 1) sowie die kumulierten Auftragsdurchlaufzeitverläufe eingetragen:

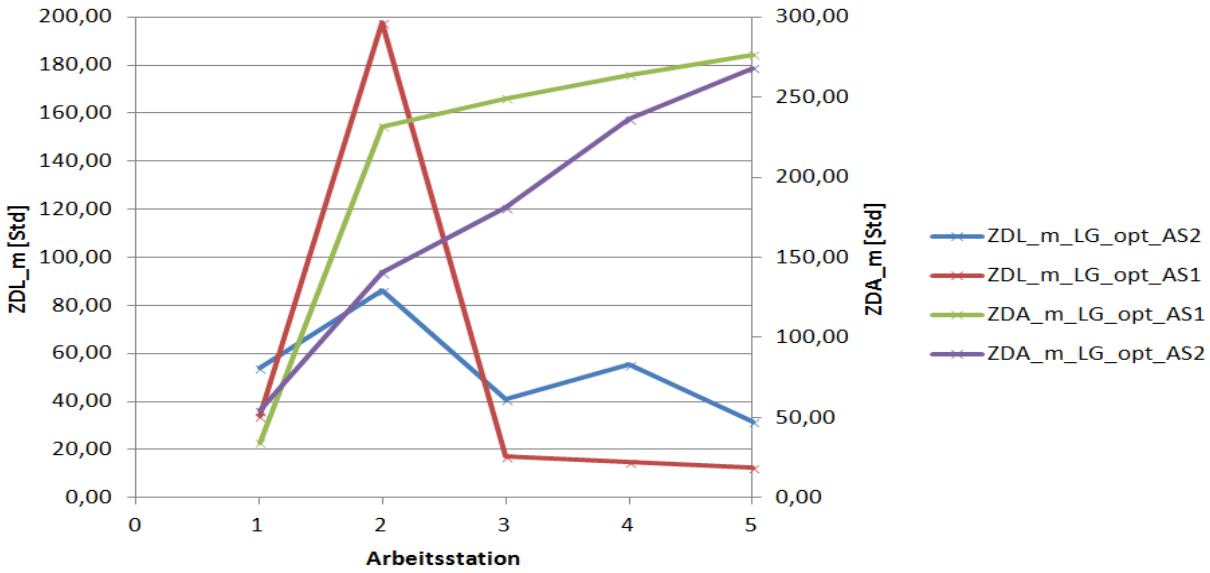


Abbildung 85: Durchlaufzeiten für LG - Kombinationen 1 und 2

Wie man sieht, ergibt die für AS 1 ermittelte Losgrößenkombination an AS 1 (wie erwartet), aber auch an AS 3, AS 4 und AS 5 niedrigere Durchlaufzeiten als die für AS 2 ermittelte Kombination. Insgesamt ergibt sich an diesen Stationen ein Zeitvorteil von ca. 103 Stunden. Jedoch führt die höhere Anzahl an Losen und damit verbundenen häufigeren Rüstvorgänge an AS 2 zu einer solch hohen Auslastung, dass die damit verbundenen Wartezeiten diese Vorteile mehr als wettmachen. Der Zeitvorteil der an AS 2 ermittelten Kombination ergibt sich schließlich zu ca. 7 Stunden bzw. ca. 7%. Im nächsten Schritt findet ausgehend von der an AS 2 ermittelten Kombination eine partielle Optimierung statt, welche aus Platzgründen hier nicht gezeigt werden soll. Die zu einer minimalen mittleren Gesamtdurchlaufzeit führende Losgrößenkombination sowie die damit erzielten Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen dargestellt:

	A			B			C			D			E		
	x [Stk]	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	$t_{a,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]
AS 1	334	106,88	18,20	250	80,00	6,50	125	80,00	14,00	74	53,82	12,60	80	64,00	9,50
AS 2	334	106,88	14,86	250	80,00	19,00	125	80,00	14,00	74	53,82	6,68	80	64,00	17,50
AS 3	334	106,88	9,35	250	80,00	11,00	125	80,00	7,25	74	53,82	19,50	80	64,00	5,00
AS 4	334	106,88	3,84	250	80,00	3,00	125	80,00	13,00	74	53,82	22,70	80	64,00	1,30
AS 5	334	106,88	7,18	250	80,00	5,50	125	80,00	25,50	74	53,82	4,20	80	64,00	4,50

Tabelle 50: auftragsdurchlaufzeitoptimale Losgrößenkombination

	$t_{a,Los,m}$	$t_{e,Los,m}$	u_m	$c_{a,Los,m}$	$c_{e,Los,m}$	$ZW_{,m}$	$ZDL_{,m}$	ZDA_m
AS 1	14,5853	11,80	0,81	1,00	0,31	27,34	39,14	39,14
AS 2	14,5853	13,84	0,95	0,64	0,34	67,22	81,06	120,20
AS 3	14,5853	11,03	0,76	0,38	0,50	6,77	17,80	137,99
AS 4	14,5853	9,89	0,68	0,45	0,89	10,31	20,20	158,19
AS 5	14,5853	8,80	0,60	0,69	0,90	8,60	17,40	175,59

Tabelle 51: Durchlaufzeitwerte für optimale Losgrößenkombination

In Tabelle 51 beschreibt die letzte Spalte die mittlere kumulierte Auftragsdurchlaufzeit durch die Linie. Bei der Wahl dieser Kombination ist also eine mittlere Gesamtdurchlaufzeit von ca. 11 Betriebskalendertagen (BKT) zu erwarten.

Statt der obigen Vorgehensweise, welche eine zeit- und rechenaufwändige partielle Optimierung beinhaltet, wird in der Literatur oftmals die Bildung des arithmetischen Mittelwerts der an den höchstausgelasteten Stationen ermittelten optimalen Kombinationen empfohlen. Dabei gilt generell als Richtwert, dass Stationen ab einer Auslastung von 80% in diese Berechnung eingebunden werden sollten (vergleiche dazu die Ausführungen in Abschnitt 5.5.3). Jedoch ergab sich im aktuellen Beispiel mit dieser Methode eine Kombination, welche in Bezug auf die Auftragsdurchlaufzeit ziemlich weit entfernt vom Optimum lag. Daher wurde hier die aufwändigere, aber genauere Methode gewählt.

5.6.4 Variation der Losgrößen

Ausgehend von der im vorigen Abschnitt ermittelten Losgrößenkombination sollen nun die Losgrößen aller Produkte schrittweise verringert bzw. erhöht werden. Zu beachten ist hierbei, dass der Bedarf in jedem Fall ein ganzzahliges Vielfaches der gewählten Losgröße betragen und in jedem Fall gedeckt sein muss. Da die Anzahl der Lose in der vorhin ermittelten Kombination sehr nahe beinander liegen, erscheint es vertretbar, für jedes Produkt eine Schrittweite von 1 (in Anzahl Lose) zu verwenden. Es ergeben sich folgende Kombinationen:

A	Anz.Lose	B	Anz.Lose	C	Anz.Lose	D	Anz.Lose	E	Anz.Lose	Anz. Lose, ges
125	8	112	9	56	9	40	11	40	10	47
143	7	125	8	63	8	44	10	45	9	42
167	6	143	7	72	7	49	9	50	8	37
200	5	167	6	84	6	55	8	58	7	32
250	4	200	5	100	5	63	7	67	6	27
334	3	250	4	125	4	74	6	80	5	22
500	2	334	3	167	3	88	5	100	4	17
1000	1	500	2	250	2	110	4	134	3	12

Tabelle 52: Variation der Losgrößen

Für jede dieser Kombinationen werden im nächsten Schritt die mittlere Ankunftsrate, die mittlere Losbearbeitungszeit, die mittlere Auslastung und schließlich die Warte - und Durchlaufzeit je Station ermittelt. Es ergibt sich:

$t_{a,Los,m}$	$c_{a,Los,m}$	$ZDL_{m,AS1}$	$u_{m,AS1}$	$ZDL_{m,AS2}$	$u_{m,AS2}$	$ZDL_{m,AS3}$	$u_{m,AS3}$	$ZDL_{m,AS4}$	$u_{m,AS4}$	$ZDL_{m,AS5}$	$u_{m,AS5}$	ZDA
24585	1	48,00	0,93		1,07	10,66	0,83	13,55	0,78	8,83	0,64	
27548	1	40,64	0,90		1,04	11,23	0,82	14,43	0,77	9,66	0,63	
31215	1	37,14	0,88		1,02	12,10	0,80	15,63	0,76	10,73	0,63	
36184	1	35,77	0,86	464,73	0,9955	13,34	0,79	17,10	0,75	12,12	0,62	543,06
42739	1	36,35	0,83	106,23	0,9726	15,10	0,77	19,18	0,75	14,01	0,61	190,88
52507	1	39,14	0,81	81,06	0,9491	17,80	0,76	22,20	0,74	16,91	0,60	177,10
67812	1	45,50	0,79	83,53	0,9259	22,10	0,74	26,41	0,73	21,58	0,60	199,11
96120	1	61,66	0,76	112,90	0,9024	31,61	0,72	34,54	0,72	30,96	0,59	271,67

Tabelle 53: mittlere Durchlaufzeiten für versch. Losgrößenkombinationen

Die ersten drei Kombinationen in Tabelle 53 führen - aufgrund des sehr groß werdenden relativen Rüstzeitanteils bei kleinen Losen - zu einer Überlastung an Station 2. Die mittlere Gesamtdurchlaufzeit für die 5 verbleibenden Losgrößenkombinationen ist im folgenden Diagramm abgebildet. Zusätzlich zu den berechneten Werten sind hier auch die mittels Simulationsläufen (mit den in Tabelle 53 aufgelisteten Eingangsdaten) ermittelten Werte abgebildet:

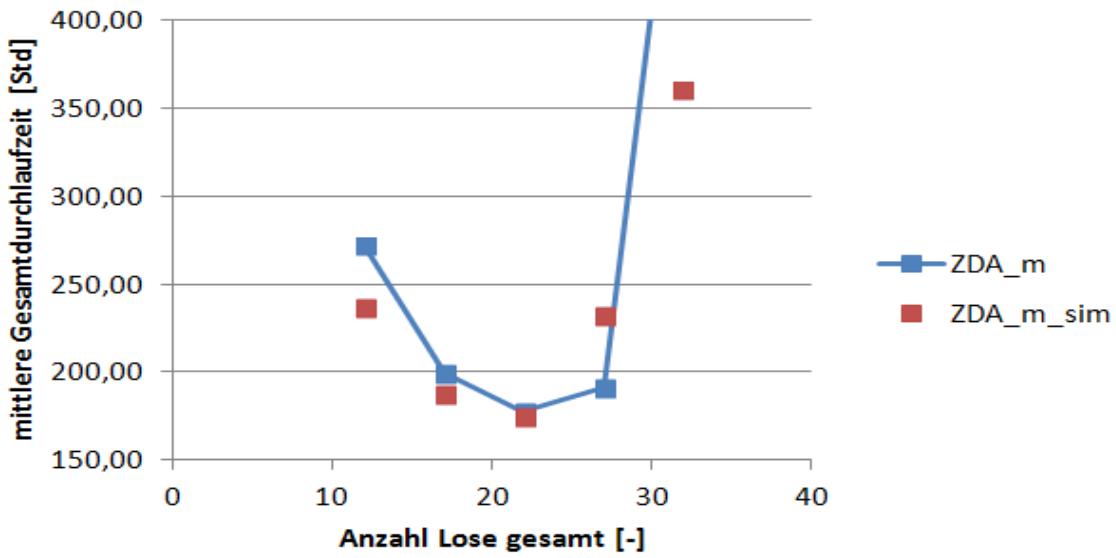


Abbildung 86: mittlere Gesamtdurchlaufzeit bei Losgrößenvariation

Auch die Simulationsergebnisse bestätigen, dass die optimale Auftragsdurchlaufzeit bei einer Losanzahl von 22 erreicht wird, bei weniger Losen steigt ZDA_m moderat, bei höherer Losanzahl jedoch wie erwartet sehr steil an.

Für die machbaren Kombinationen werden nun die mittleren Durchlaufzeiten an den einzelnen Stationen dargestellt:

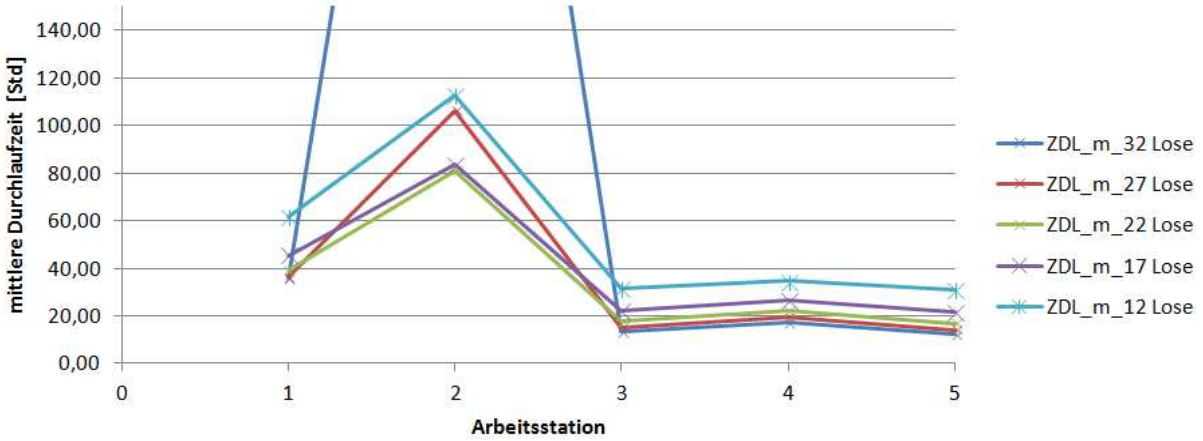


Abbildung 87: mittlere Durchlaufzeiten für versch. Losgrößenkombinationen

Es lässt sich ablesen, dass an AS 2 bei allen Kombinationen der weitaus größte Anteil an der Gesamtdurchlaufzeit anfällt. Dies ist vor allem auf die sehr hohe Auslastung dieser Station im Vergleich zu den anderen Stationen zurückzuführen. Eine hohe Anzahl an Losen mit der damit verbundenen häufigen Umrüstung der Arbeitsstation 2 führt zu exorbitanten Warte- und damit Durchlaufzeiten an dieser Station. Die vorhin ermittelte optimale Losgrößenkombination (22 Lose) zeigt im Vergleich zu den Kombinationen mit niedrigerer Losanzahl die niedrigste Durchlaufzeit an Station 2. Auch an den anderen Stationen liefert diese Kombination nur unwesentlich höhere Werte als die für diese Stationen optimalen Kombinationen. Das Optimum in der Gesamtdurchlaufzeit rührt also vor allem daher, dass an allen Stationen gute und am Engpass optimale Ergebnisse erzielt werden. In den folgenden Diagrammen sind deshalb die erzielten Durchlaufzeitwerte der unterschiedlichen Losgrößenkombinationen an AS 2 (Engpass) und AS 3 (unkritische Arbeitsstation wegen niedriger Auslastung) separat dargestellt. Dabei sind sowohl die berechneten als auch die simulierten Ergebnisse eingetragen.

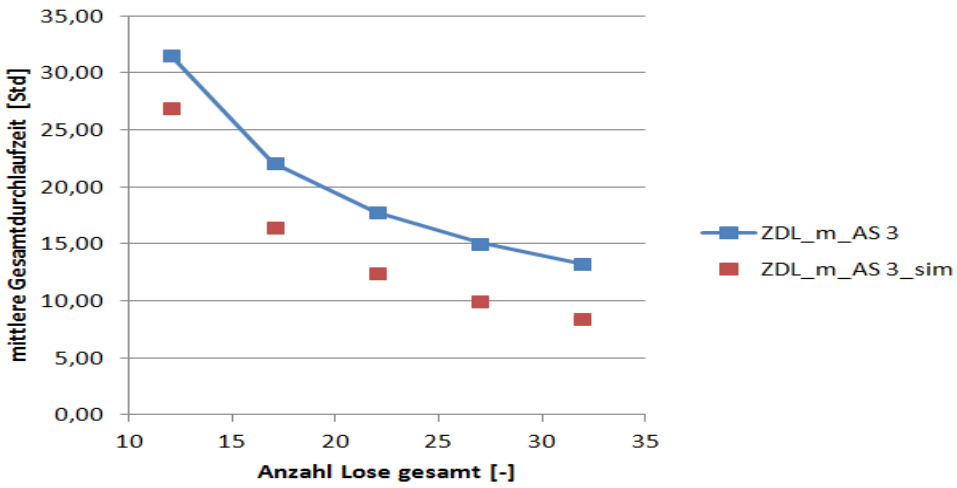


Abbildung 88: mittlere Durchlaufzeit AS 3 bei versch. Losgrößenkombinationen

Bei AS 3 kommt es aufgrund der relativ niedrigen Auslastung zu sehr schwachen Effekten der Losgrößenwahl. Für eine solche Station wäre es aufgrund der großen freien Kapazitäten (welche für Rüstvorgänge genutzt werden könnten) optimal, viele kleine Lose zu bearbeiten. Jedoch ist dies aufgrund der vorhin genannten Gründe nicht möglich. Insgesamt lassen sich aber keine signifikanten Einflüsse der gewählten Kombinationen auf die mittlere Durchlaufzeit an dieser Station feststellen. Der Unterschied der Durchlaufzeiten der für diese Station besten Lösungskombination und der für diese Station schlechtesten beträgt nur 19 Stunden (was an dieser Station viel erscheint, im Vergleich mit den Effekten an AS 2 aber vernachlässigbar ist). Auch eine relativ große Streuung der Arbeitsinhalte macht sich (wieder aufgrund der niedrigen Auslastung) nicht wirklich bemerkbar. Nun sollen die Durchlaufzeiteffekte der unterschiedlichen Losgrößenkombinationen an Station 2, welche den Engpass der Linie darstellt, untersucht werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 89 dargestellt:

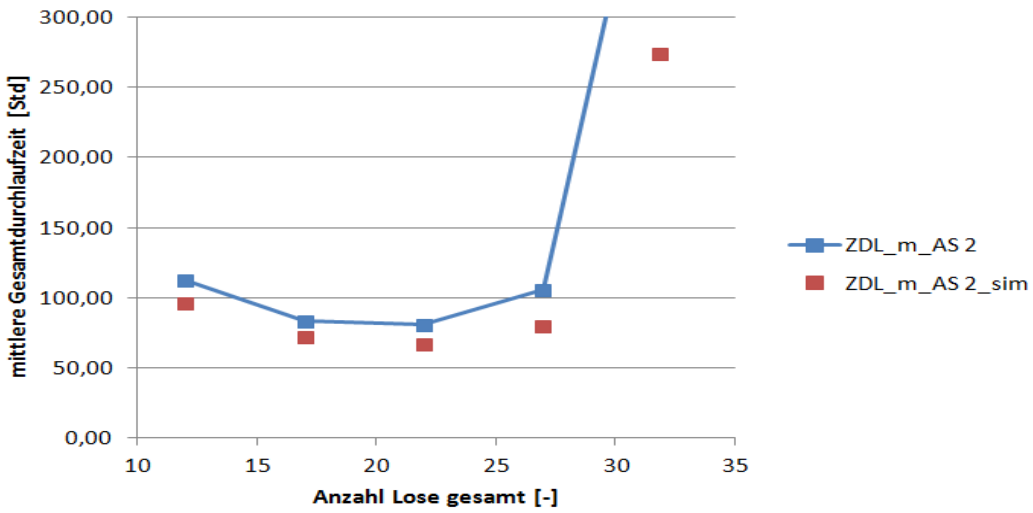


Abbildung 89: mittlere Durchlaufzeit an AS 2 für versch. Losgrößenkombinationen

Hier ergibt sich für die erzielte Durchlaufzeit eine errechnete Differenz von 360 Stunden zwischen der optimalen (22) und der höchstmöglichen Anzahl an Losen (47). Die Simulationsdaten ergeben immerhin eine Differenz von ca. 210 Stunden. Sowohl die errechneten als auch die simulierten Ergebnisse verdeutlichen also den Umstand, dass bei hoch ausgelasteten Maschinen die Wahl der richtigen Losgrößenkombination einen sehr großen Unterschied in der erzielten Durchlaufzeit ausmacht. Außerdem wirken sich stark streuende Arbeitsinhalte hier stärker aus als bei schwach ausgelasteten Maschinen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine reine Dimensionierung der Losgrößen am Engpass sehr schnell zu relativ guten Ergebnissen für die Durchlaufzeit führt, jedoch eine weiterführende Optimierung unter Einbeziehung aller am Produktionsprozess beteiligten Stationen zu noch wesentlich besseren Ergebnissen führen kann. Vor allem eine

gleichmäßigere Verteilung der Durchlaufzeiten auf die unterschiedlichen Arbeitsstationen bringt hier sehr große Vorteile. Dies deckt sich mit der von zahlreichen Autoren geforderten Glättung der Arbeitsinhalte.

5.6.5 Exkurs - Ermittlung der Prozesskennlinien

In ihrem Buch "Logistische Kennlinien" erläutern die Verfasser Nyhuis und Wiendahl, dass sich nicht nur für Einzelarbeitsstationen Produktionskennlinien, sondern auch für Netzwerke und Produktionslinien sogenannte Prozesskennlinien mittels der von ihnen entwickelten Kennlinientechnik darstellen lassen.[307] Dazu benötigt man als Ausgangsdaten den idealen Mindestbestand sowie die maximale Leistung für jede am Produktionsprozess beteiligte Arbeitsstation, welche wie in Abschnitt 5.4.5.2 ermittelt werden. Für die Ermittlung der Prodzesskennlinie benötigt man sodann deren mit der Kapazität der jeweiligen Station gewichteten Mittelwert:

Linie				
AS	$BiA_{min,\,i}$ [-]	LA_{max} [1/BKT]	$BiA_{min,\,PZK}$ [-]	$LA_{max,PZK}$ [1/BKT]
1	1,019	0,806	9,252	0,997
2	1,004	0,997		
3	1,074	0,575		
4	1,507	0,413		
5	1,189	0,795		

Tabelle 54: idealer Mindestbestand und maximale Leistung der Produktionslinie

Mit diesen Ausgangsdaten lassen sich nun die mittlere Leistung (in Anzahl Aufträgen/BKT), die mittlere Auslastung der Linie (welche gleich der mittleren Auslastung des Engpasses ist), der mittlere Bestand (in Anzahl Aufträgen) sowie schließlich die mittlere Auftragsdurchlaufzeit im Betriebspunkt ermitteln. Es ergibt sich:

$A_{m,PZK}$ [%]	$BA_{m,PZK}$ [1]	$ZDL_{m,PZK}$ [BKT]	$ZDL_{m,PZK}$ [Std]
95,05000	16,00183	16,88451	270,15209

Tabelle 55: Bestands- und Zeitgrößen im Betriebspunkt

Durch Variation des Laufparameters t und damit der Auslastung der Linie lassen sich nun - analog zur Vorgehensweise in Abschnitt 5.4.5 - die gesuchten Verläufe entsprechend Tabelle 56 ermitteln:

[307] Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.

Ermittlung der Prozesskennlinien mittels der Kennlinientheorie					
t	$LA_{m,PZK}$ (t)	$A_{m,PZK}$ [%]	$BA_{m,PZK}$ [1]	$ZDL_{m,PZK}$ [BKT]	$ZDL_{m,PZK}$ [Std]
0,000001	0,1210	12,06166	0,485	4,01	64,14
0,00001	0,2073	20,666418	0,831	4,01	64,17
0,0001	0,3449	34,39	1,387	4,02	64,33
0,001	0,5447	54,306876	2,224	4,08	65,32
0,01	0,7837	78,140217	3,544	4,52	72,35
0,03	0,8864	88,382347	4,759	5,37	85,91
0,0625	0,9402	93,75	6,282	6,68	106,90
0,1	0,9661	96,331047	7,893	8,17	130,72
0,2	0,9908	98,795867	12,013	12,12	193,98
0,4	1,0012	99,824321	20,095	20,07	321,15
0,7	1,0029	99,994704	32,163	32,07	513,14
1	1,0029	100	44,225	44,10	705,53

Tabelle 56: Ermittlung der Prozesskennlinien mittels der Kennlinientechnik

Die "klassische" Kennlinienform ergibt sich nun durch Auftragen der Leistungs - und Durchlaufzeitkennlinien über der Regelgröße, dem Bestand in Anzahl Aufträgen:

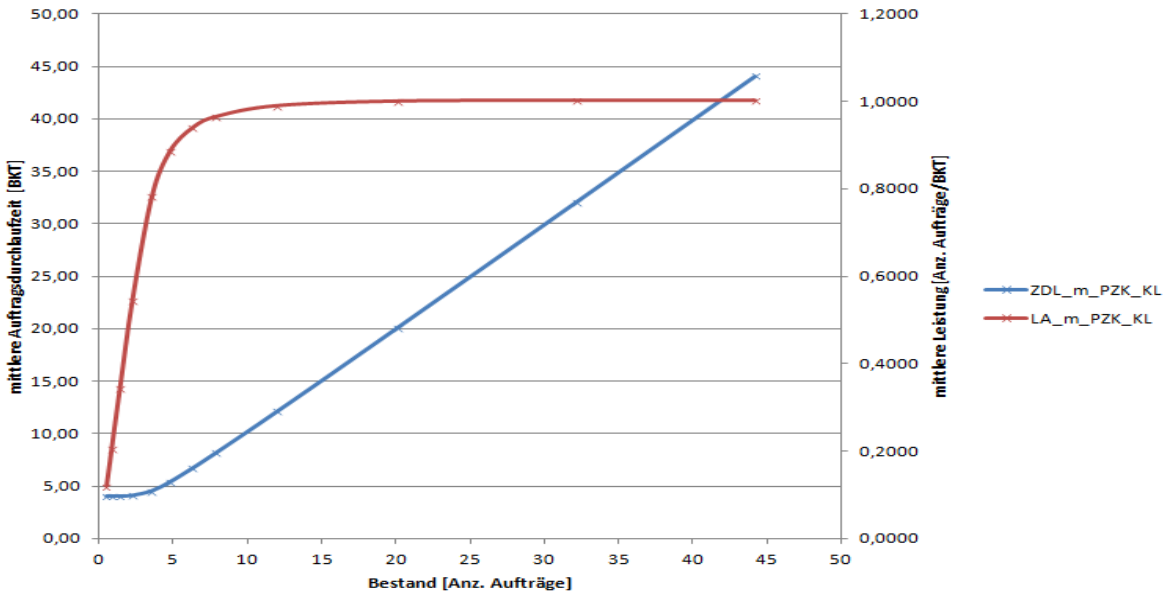


Abbildung 90: Prozesskennlinien mittels Kennlinientheorie

Das obige Diagramm besagt, dass für eine näherungsweise Vollauslastung (Auslastungsgrad des Engpasses > 99%) der Linie ein Auftragsbestand (WIP) von ca. 20 Aufträgen in der Linie gehalten werden muss.

Alternativ lassen sich die Prozesskennlinien auch mit den Werkzeugen der Warteschlangentheorie ermitteln. Als Ausgangsbasis dienen auch hier die Auslastungsgrade aus Tabelle 56, welche sich durch entsprechende Anpassung der mittleren Ankunftsrate an der ersten Station der Linie erzielen lassen. Die Berechnung der Leistungs- und Zeitgrößen

sowie des mittleren Bestandes erfolgt danach gemäß den Gleichungen aus den Abschnitten 3.4, 4.2 und 4.4 sowie 3.5. Es ergeben sich folgende Daten:

Prozesskennlinien mit Warteschlangentheorie				
$A_{m,PZK}$ [%]	$LA_{m,PZK}$	$ZDL_{m,PZK}$ [Std]	$ZDL_{m,PZK}$ [BKT]	$BA_{m,PZK}$ [1]
12,0617	0,1203	59,34	3,71	0,52
20,6664	0,2061	62,59	3,91	0,93
34,3900	0,3429	68,53	4,28	1,70
54,3069	0,5415	79,44	4,96	3,12
78,1402	0,7791	103,01	6,44	5,81
88,3823	0,8812	128,18	8,01	8,18
93,7500	0,9348	161,44	10,09	10,93
96,3310	0,9605	203,19	12,70	14,14
98,7959	0,9851	386,41	24,15	27,58
99,8243	0,9953	1922,70	120,17	138,65
99,9947	0,9970	59653,43	3728,34	4309,13
100,0000	0,9971	3152749,14	197046,82	227753,87

Tabelle 57: Ermittlung der Prozesskennlinien mittels der Warteschlangentheorie

Mit diesen Werten lassen sich nun erneut die Prozesskennlinien darstellen:

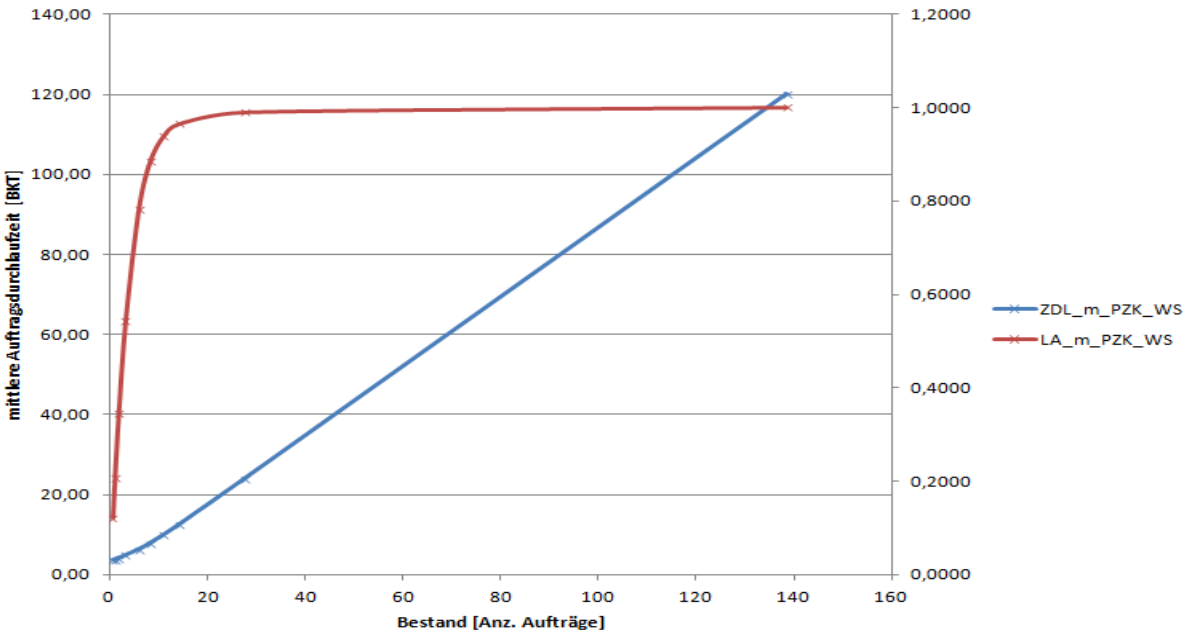


Abbildung 91:Prozesskennlinien mittels Warteschlangentheorie

Es lässt sich sofort die wesentliche Aussage erkennen, nämlich dass sich eine sehr hohe Auslastung (über 99%) nur mit wesentlich höheren Beständen und Durchlaufzeiten erreichen lässt, als die Berechnung über die Kennlinientheorie ergeben hat. Auch im Betriebspunkt (Auslastung 95,05%) ergibt sich laut der Warteschlangentheorie bereits ein WIP von 13 Aufträgen, wogegen diese Auslastung laut der Kennlinientheorie bereits mit einem WIP von 7 Aufträgen erreicht werden kann.

Aufgrund dieser wesentlichen Unterschiede in den Ergebnissen für die Bestands - und Zeitgrößen sollen die mithilfe der beiden unterschiedlichen Verfahren ermittelten Verläufe mittels Simulationsläufen überprüft werden. Dazu wurde die mittlere Ankunftsrate an der ersten Station (welche durch die Vorgabe u < 1 über die gesamte Linie hinweg gleich bleibt und den maximal möglichen Durchsatz darstellt) sukzessive erhöht und - nach Erreichen eines stationären Zustandes - die mittlere Auftragsdurchlaufzeit sowie die Auslastung der Linie abgelesen. Es ergaben sich folgende Daten:

Simulation		
$c_{a,Los,m}$= 1		
$t_{a,Los,m}$ [sek]	$ZDL_{m,PZK}$[Std]	$u_{m,sim}$ [%]
413160	55,6	12,6
241135	56,9	21,46
144908	59,3	34,45
91764	65,9	54,38
63775	82,5	77,65
56385	134,1	90,3
53156	162	93,33
51732	233,5	95,9
50441	323	97,9
49922	1080	99,46
49837	1473	99,65
49834	1544	99,67

Tabelle 58: Ermittlung der Prozesskennlinien mittels Simulationsläufen

Im abschließenden Schritt sollen nun die Ergebnisse analog zur Vorgehensweise in Beispiel 2 verglichen werden. Dazu wird der Verlauf der mittleren Auftragsdurchlaufzeit über der Auslastung aufgetragen. Außerdem wird nur der interessante Bereich zwischen 80% und 100% Auslastung dargestellt, da geringere Auslastungen unwirtschaftlich und daher für die Betrachtung nicht relevant sind.

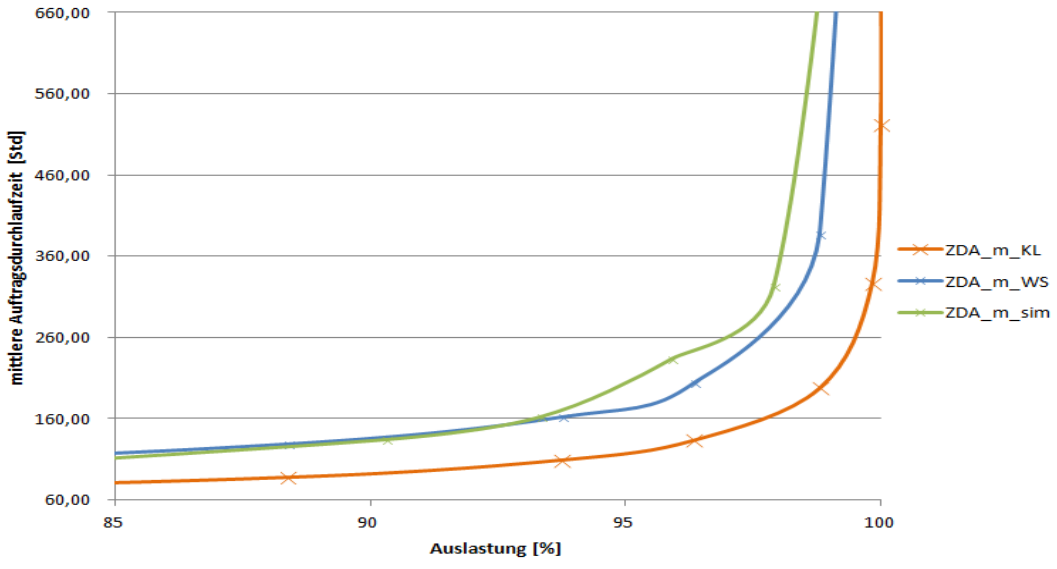


Abbildung 92: Gegenüberstellung der ermittelten Auftragsdurchlaufzeitkennlinien

Es zeigt sich, dass die simulierten Daten wieder - ähnlich den Ergebnissen in Abschnitt 5.4.5.3 - eine ziemlich gute Übereinstimmung mit dem mittels der Warteschlangentheorie berechneten Verlauf aufweisen. Der Durchlaufzeitverlauf über die Kennlinientheorie weist wiederum erneut wesentlich niedrigere Werte vor allem im Bereich zwischen 95 und 100% Auslastung auf. Es kann also darauf geschlossen werden, dass auch in diesem Fall ein Streckfaktor von 10 nicht zutreffend ist. Deshalb wurde wieder ein Wert für α gesucht, welcher die beste Übereinstimmung mit den simulierten Daten ergibt. Für α=23 konnte im Abknickbereich eine recht gute Annäherung an den simulierten Verlauf erreicht werden, jedoch müsste nun erneut auch die Krümmung (C-Wert) angepasst werden, da die Kennlinie ansonsten im hochausgelasteten Bereich viel zu flach verläuft, siehe Abbildung 93:

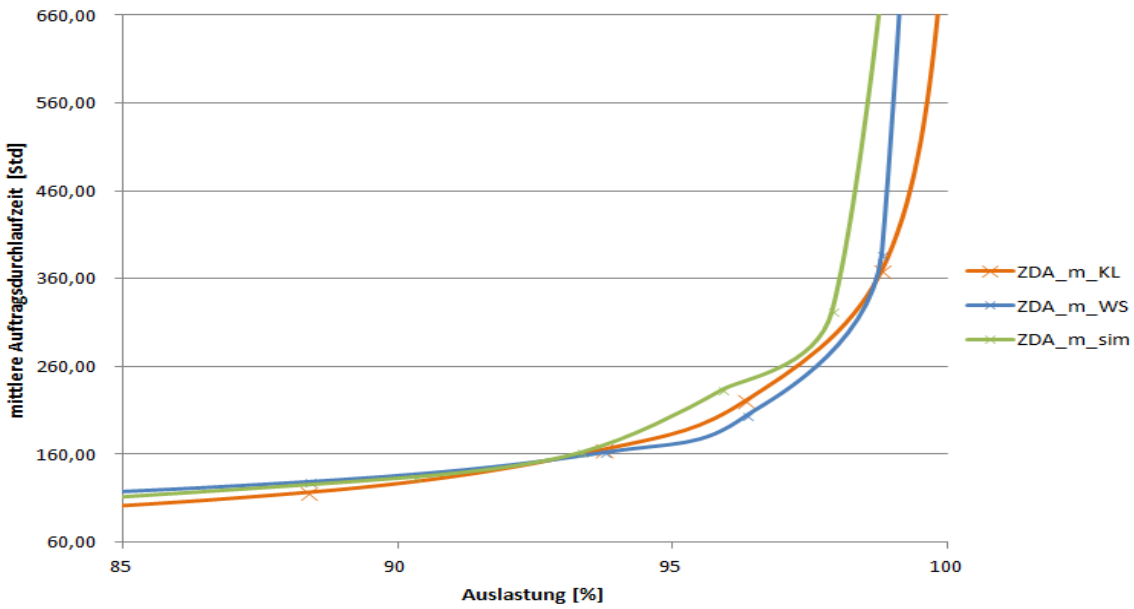


Abbildung 93: Auftragsdurchlaufzeitkennlinie mit alpha = 23

Es bleibt also - zumindest für die betrachteten Fälle - fraglich, in welchem Szenario ein Streckfaktor von 10 den "realen" Verlauf der Durchlaufzeitkennlinie ausreichend genau annähert. Weiters steht offen, wie man bei veränderter Variabilität im Ankunftsstrom bzw. in der Streuung der Arbeitsinhalte einen neuen Wert für α bzw. für C für eine erneute Anpassung finden soll.

5.6.6 Varianzbehaftete Bearbeitungszeiten

Im Allgemeinen lassen sich die Stückbearbeitungszeiten nicht vollständig beherrschen. Bei den meisten Stationen kommt es alleine aufgrund der manuellen Tätigkeiten zu einer gewissen Streuung der Einzelbearbeitungszeiten (zB. wenn sich einzelne Werkstücke verklemmen oder der Bediener die Werkstücke von einer Palette abladen muss). Gemäß Abschnitt 3.4.2 soll nun die Bearbeitungszeit mit einem Variationskoeffizienten von 0,3 versehen werden, was einem durchaus gut beherrschten Prozess entspricht. Dadurch

erweitert sich die Berechnung des Wertes $c_{e,Los,m}$ gemäß Gleichung (4.24). Die mittlere Auftragsdurchlaufzeit wird dadurch wie erwartet - wenn auch gering - erhöht. Der Effekt steigt hierbei mit steigender Auslastung. Abbildung 94 zeigt den mittels der Warteschlangentheorie errechneten Verlauf sowie die mit den entsprechenden Parametern ermittelten Simulationsdaten. Die zugrundeliegenden Berechnungs- und Simulationsdaten sind im Anhang in Tabellen 63. Zum Vergleich wurde auch die über die Kennlinientheorie ermittelte Durchlaufzeitkennlinie eingetragen (α=23):

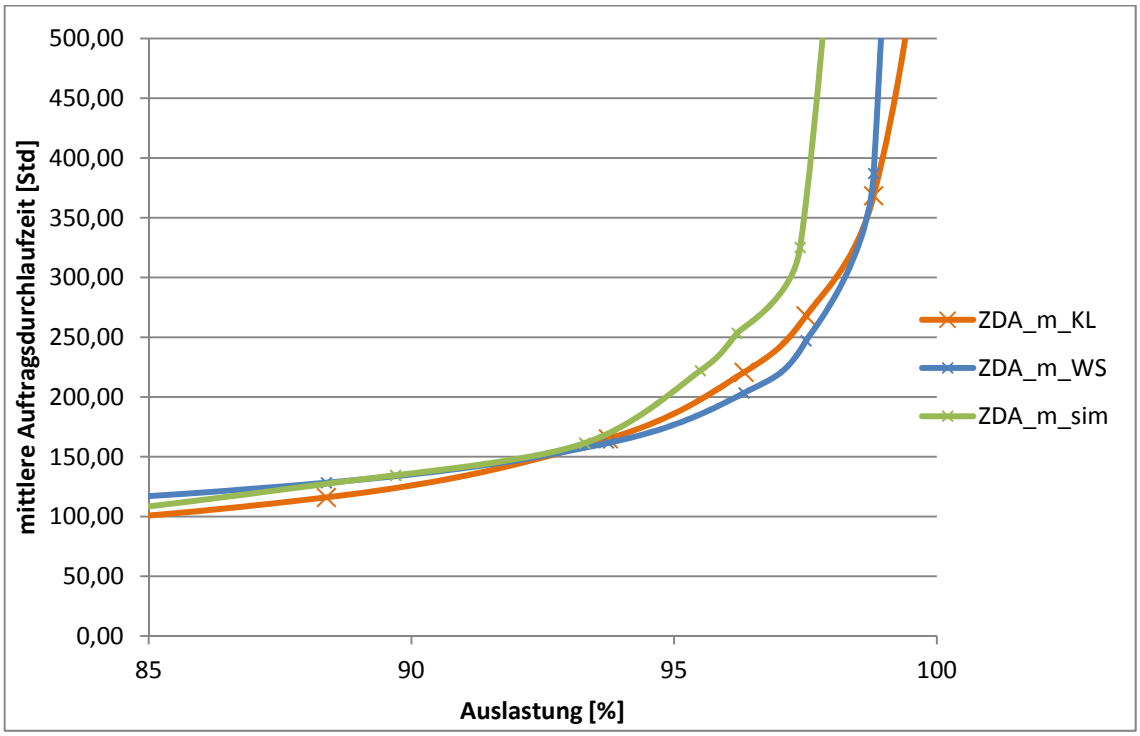


Abbildung 94:Gegenüberstellung der ermittelten Auftragsdurchlaufzeiten bei ce = 0,3

Die Kennlinientheorie bietet keine Möglichkeit, varianzbehaftete Stückbearbeitungszeiten zu berücksichtigen (vergleiche dazu die Diskussion in Abschnitt 2.4.5). Daher ist es logisch, dass sich in einem solchen Fall eine noch schlechtere Übereinstimmung als im Falle konstanter Bearbeitungszeiten ergibt. Vor allem der steile Anstieg der Durchlaufzeitkurve im sehr hoch ausgelasteten Bereich wird nicht ausreichend angenähert. Es kann angenommen werden, dass dieser Effekt umso ausgeprägter sichtbar wird, je stärker die Bearbeitungszeiten streuen. Somit kann hier festgestellt werden, dass auch für eine exakte analytische Behandlung des Durchlaufverhaltens einer Produktionslinie vor allem bei stochastischen Einflüssen die warteschlangentheoretischen Grundlagen eine weitaus bessere Basis bilden, da hier alle Einflüsse direkt in die Berechnung einfließen und daher eine Schätzung mithilfe einer mathematischen Funktion nicht notwendig ist.

5.7 Auswertung der Untersuchungsergebnisse

Anmerkung: *Da in den behandelten Beispielen des praktischen Teils die Ergebnisse direkt diskutiert wurden, soll hier nur noch eine übersichtsmäßige Zusammenfassung der jeweiligen Betrachtungen erfolgen.*

In Beispiel 1 wurde der einfachste Fall einer Produktion - ein 1x1 System - betrachtet. Dabei war die Darstellung prinzipieller Abhängigkeiten das vorrangige Ziel. Unter Variation der Art des Ankunfts - bzw. Bearbeitungsprozesses wurden die interessierenden Zeitgrößen sowohl berechnet wie auch in Simulationsläufen ermittelt. Hierbei wurde - um die Konsistenz der Aussagekraft über alle Beispiele hinweg zu bewahren - ein Rüstvorgang vor bzw. nach jedem Los vorausgesetzt, es wurden also keine Rüstverwandtschaften berücksichtigt. Bei einer deterministischen Ankunftsrate der Aufträge sowie deterministischer Bearbeitungszeiten ergab sich erwartungsgemäß eine lineare Abhängigkeit der Durchlaufzeit von der Losgröße. Jedoch stellte sich heraus, dass bei stochastischen Ankunfts- und Bearbeitungszeiten (M|M|1 - und G|G|1 - Modell) ein stark nichtlinearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen besteht. Im Falle von losgrößenabhängigen Ankunftsintervallen existiert außerdem eine definierte durchlaufzeitoptimale Losgröße. Dies lässt sich durch die (durch den relativen Rüstanteil verursachte) hohe Auslastung bei kleinen Fertigungslosgrößen und den damit verbundenen großen Einfluss der Variabilität für diesen Fall erklären. Die optimale Losgröße liegt dabei umso höher, je höher die Auslastung der Station ist. Die Variabilität der Ankünfte und Bearbeitungszeiten erhöhen die Durchlaufzeitwerte generell. Dieser Umstand konnte durch die Ermittlung der Variationskoeffizienten aus (fiktiven) Stichproben bestätigt werden. Die berechneten Verläufe deckten sich in ihrer Charakteristik gut mit den Simulationsergebnissen, jedoch konnte eine durchgängige "Überschätzung" durch das Warteschlangenmodell festgestellt werden. Dies stellt aber hinsichtlich einer realen Ablaufplanung ein eher geringes Problem dar, da Liefertermine dadurch nicht gefährdet werden, lediglich zwischenzeitliche "Leerzeiten" für die Produktion auftreten können, was bei Vorhaltung eines ausreichenden Auftragsbestandes und einer rechtzeitigen Einsteuerung neuer Aufträge beherrschbar sein sollte.

Im zweiten Beispiel wurde die Erweiterung vom Einprodukt- auf den Mehrproduktfall vorgenommen. Hier konnte erkannt werden, dass die in Abschnitt 4.4.1 erwähnten Näherungsverfahren recht gute Ergebnisse liefern, jedoch durch partielle Optimierung weitere - teilweise wesentliche - Verbesserungen im Hinblick auf die erzielte Durchlaufzeit erreicht werden können. Bei gleichmäßiger Variation der Losgrößenkombinationen (annähernd gleiche Schrittweiten) konnte (bei varianzbehafteten Ankünften) eine ähnliche Abhängigkeit der Durchlaufzeit von der Gesamtlosanzahl wie in Beispiel 1 beobachtet werden. Weiters wurde noch der in Abschnitt 4.4.1.1 erwähnte Substitutionseffekt untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich bei gegenläufiger Variation der

Losgrößen - eine konstante Gesamtanzahl von Losen vorausgesetzt - die Durchlaufzeit nur in sehr geringem Maße ändert. Im Exkurs des zweiten Beispiels wurden für die betrachtete Arbeitsstation Produktionskennlinien mithilfe der beiden im theoretischen Teil besprochenen analytischen Ansätze - dem Approximationsverfahren der Kennlinientheorie und der Warteschlangentheorie - erstellt und mit den Simulationsdaten verglichen. Dabei stellte sich eine bessere Übereinstimmung der simulierten Daten mit den warteschlangentheoretischen Ergebnissen heraus.

In Beispiel 3 wurde eine Produktionslinie betrachtet, welche von gleichartigen Aufträgen durchlaufen wird. Anhand dieses Szenarios konnte gezeigt werden, dass die Losgrößenentscheidung vornehmlich am Engpass der Linie getroffen werden sollte, da hier die kritischen Anteile an der Gesamtdurchlaufzeit anfallen. Weiters wurde anhand dieses Beispiels die Variabilitätsfortpflanzung gemäß der Theorie aus Abschnitt 3.4.4 erläutert. Außerdem wurde noch gezeigt, dass durch Aufteilung der Prozesslosgröße (welche oft aufgrund der Engpasssituationen in der Linie recht groß gewählt werden müssen) in kleinere Teillose eine erhebliche Durchlaufzeitverkürzung erzielt werden kann.

Im vierten Beispiel schließlich wurde eine Produktionslinie simuliert, welche von mehreren Aufträgen durchlaufen wird. Wieder wurde - analog zu Beispiel 2- eine durchlaufzeitoptimale Kombination gefunden. Diese ergab sich als Zwischenlösung der optimalen Kombinationen an den höchstausgelasteten Stationen der Linie. Dazu wurde der Effekt der Losgrößenvariation auf die Durchlaufzeit an einer niedrigausgelasteten Station und am Engpass verglichen und diskutiert. Den Abschluss der Untersuchungen bildete die Erstellung der Prozesskennlinien, welche sich als Aggregation von Produktionskennlinien verstehen. Diese wurden wieder mittels der beiden unterschiedlichen Ansätze sowie durch Simulationsläufe erstellt. Dabei erwiesen sich erneut die warteschlangentheoretischen Berechnungen als genauer.

6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von Losgrößenentscheidungen auf die Durchlaufzeit des Auftrages bzw. der Aufträge untersucht. Dabei wurden sehr einfache Fälle wie auch etwas umfangreichere Konstellationen betrachtet.

Im zweiten Kapitel wurden die grundlegenden Modelle der produktionslogistischen Planung erläutert. Hierin wurde besonderes Augenmerk auf den Vergleich zwischen dem Trichtermodell, welches der Kennlinientheorie zugrundeliegt, und dem Gesetz von Little, welches bei der Modellierung über die Warteschlangentheorie Verwendung findet, gelegt. Die anschließende Erstellung der Produktionskennlinien mittels der unterschiedlichen Methoden und insbesondere die Diskussion in Abschnitt 2.4.5 erforderten viel Recherche - und Forschungsaufwand, da die kritische und stichhaltige Beurteilung der unterschiedlichen Ansätze im Zusammenhang der Arbeit als sehr wichtig erschien.

Im dritten Kapitel standen die bereits vorhin erwähnten warteschlangentheoretischen Modelle im Mittelpunkt, welche sich durch die Parameter der Ankunfts-, Abfertigungs- und Abgangsprozesse an den jeweiligen Stationen vollständig beschreiben lassen. Vor allem der Ermittlung der Parameter der effektiven Prozesszeit kam an dieser Stelle große Bedeutung zu, da diese sich in Streuung und Mittelwert unmittelbar auf die Losbearbeitungszeit bzw. Auftragszeit auswirkt. Die Ermittlung der Durchlaufzeit, der Leistung sowie des Bestandes erfolgt danach mithilfe des Gesetzes von Little. Die Ausführungen in diesem Kapitel stützten sich weitgehend auf die Erläuterungen von Hopp und Spearman in ihrem Buch "Factory Physics". Nach einer groben Übersicht über die grundlegenden Warteschlangenmodelle wurde der Übergang zu Warteschlangennetzwerken vollführt, wobei sich (in Verbindung mit den Ergebnissen des praktischen Teils) herausstellte, dass sich diese in den betrachteten Fällen sehr gut durch ein Netz bestehend aus G|G|1- bzw. G|G|m- Modellen darstellen lassen.

In Kapitel 4 wurden die unterschiedlichen durch die Wahl der Losgrößen beeinflussbaren Zeitanteile der Auftragsdurchlaufzeit erläutert. Dabei wurde im Wesentlichen zwischen den beiden Extremfällen einer geschlossenen Fertigung (losweiser Transport in der Prozess- bzw. Fertigungslosgröße) und des One - Piece - Flows (Transport in Losgröße 1) unterschieden. Der Effekt eines Transports in Teillosen wurde im Abschnitt 4.5.3 erörtert. Hierbei wurde festgestellt, dass die Gleichungen zur exakten Ermittlung der Auftragsdurchlaufzeit für den Fall offener Produktionsstrukturen mit stark unterschiedlichen Bearbeitungszeiten an den beteiligten Stationen, welche in der Literatur in unterschiedlich großer Genauigkeit berücksichtigt werden, noch weiterer Forschungen bedarf. Schwierigkeiten bereitete in diesem Kapitel der Abschnitt 4.2.5, da die Aussage aus Kapitel 2, dass vereinzelte große

Aufträge eine Station blockieren können, aufgrund der varianzbehafteten Bearbeitungszeiten und des diesbezüglichen Loseffektes qualitativ bestätigt werden konnte, jedoch trotz sichtbarer Effekte bei diversen Versuchen über Simulationsläufe kein schlüssiger Beweis erbracht werden konnte. Auch dieses Thema bedarf also noch weiterer Forschungen. Schließlich wurden in diesem Kapitel einige Näherungsverfahren zur Ermittlung durchlaufzeitoptimaler Losgrößen bzw. Losgrößenkombinationen vorgestellt, welche im praktischen Teil ihre Anwendung fanden.

Im praktischen Teil konnte sodann anhand einiger Beispiele aufgezeigt werden, welch großen Einfluss die Wahl der richtigen Fertigungslosgröße auf die Auftragsdurchlaufzeit ausübt. Dabei wurde sowohl der Ein- wie auch der Mehrproduktfall betrachtet. Aufgrund der hohen Komplexität des Themas wurden jedoch in jedem Beispiel einige Vereinfachungen vorgenommen, welche der Anschaulichkeit dienlich, jedoch in einer realen Produktionsumgebung natürlich nicht zulässig sind.

Daher wären hier weiterführende Forschungen für allgemeinere Fälle notwendig, um die verschiedenartigen Einflüsse durch die Variabilitäten im Auftragszugang, der Bearbeitung sowie deren Fortpflanzung im Materialfluss vollständig zu untersuchen. Vor allem folgende Punkte sind während der Arbeit aufgefallen, konnten aber aufgrund des begrenzten Rahmens nicht anhand von Beispielen untersucht werden:

- Verzweigungen (analytische, synthetische und umgruppierende Produktionsstrukturen, vgl. Abbildung 34)
- Mehrstufige Fertigungsprozesse, Montagevorgänge
- Variabilität zusammengesetzter Ankunftsströme
- Wartezeiten bei überlappender Fertigung (vgl. Abschnitt 4.5.3)
- Effekt der Position von Arbeitsstationen mit varianzbehafteter Bearbeitungsprozesse in der Produktionslinie
- Mehrfach durchlaufene Arbeitsstationen (vgl. Abschnitt 3.8.2)

Einen nicht unwesentlichen Anteil der Arbeit machte die Untersuchung der beiden produktionslogistischen Grundmodelle, also der Warteschlangentheorie und der Kennlinientheorie, aus. Wie sich herausstellte, bietet das Warteschlangenmodell weitaus mehr Möglichkeiten, den tatsächlichen (bzw. in dieser Arbeit simulierten) Zustand eines Produktionssystems abzubilden. Vor allem bei varianzbehafteten Vorgängen erweist sich die Ermittlung der Durchlaufzeit über die vorherige Bestimmung der Wartezeiten vor allem bei hochausgelasteten Stationen als sehr sinnvoll. Damit soll jedoch keinesfalls die prinzipielle Richtigkeit der Kennlinientheorie infrage gestellt werden, da diese vor allem zur logistischen Positionierung von Unternehmen sowie bezüglich genereller Analysen des

Produktionsablaufs eines Unternehmens ein leicht zugängliches wie auch erprobtes Mittel darstellt.

Abschließend bleibt festzustellen, dass der in dieser Arbeit behandelte Untersuchungsgegenstand zwar in der Literatur oftmals als wichtig dargestellt wird, detaillierte Forschungsergebnisse diesbezüglich aber noch Mangelware sind. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen darauf schließen, dass es durchaus der Mühe wert ist, sich diesem Thema in weiteren Untersuchungen noch näher zu widmen, da eine möglichst genaue Produktions- und Ablaufplanung im Zentrum des Interesses produzierender Unternehmen stehen sollte.

7 Anhang

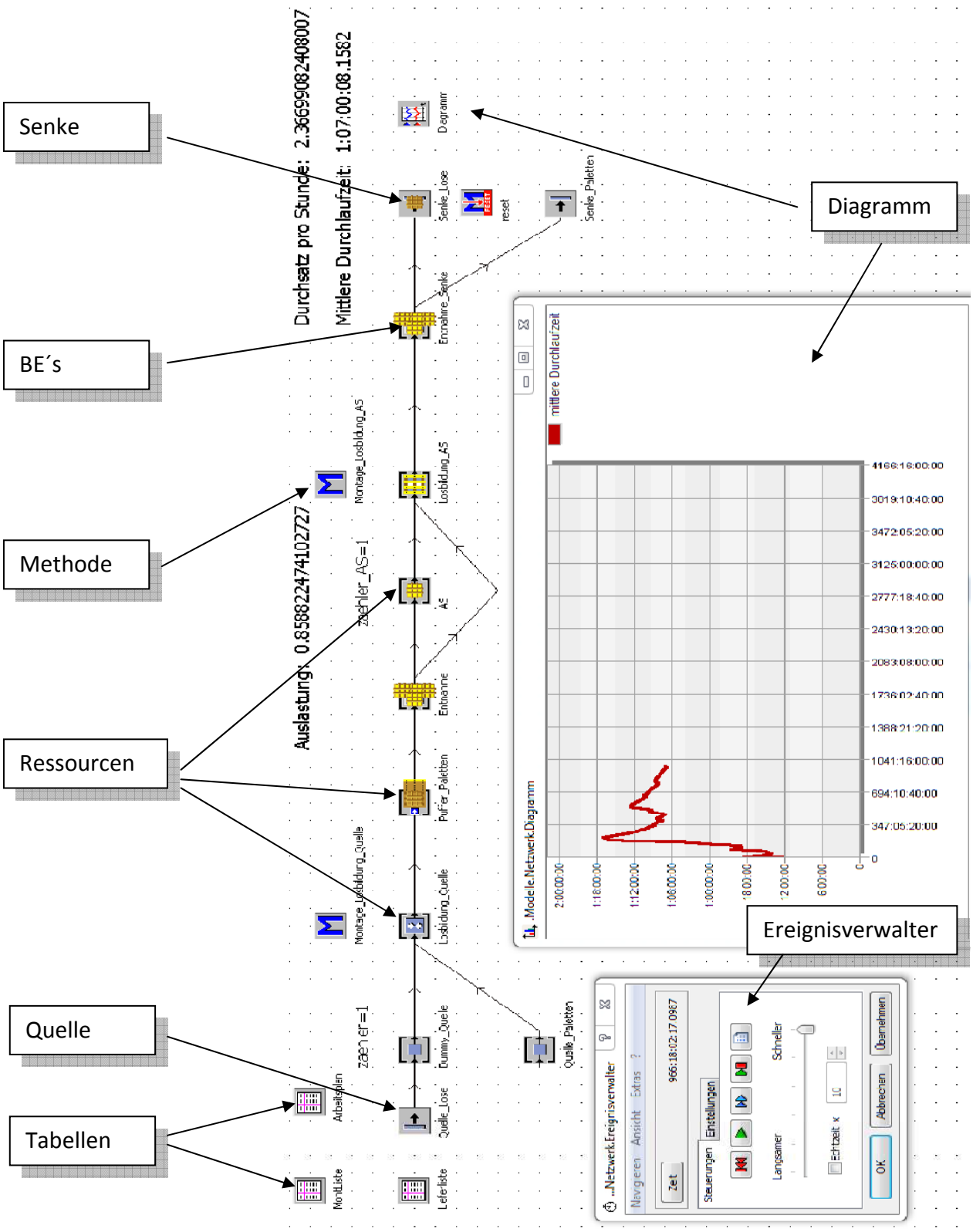


Abbildung 95: elementare Bausteine von Plant Simulation

7.1 Anhang Beispiel 1

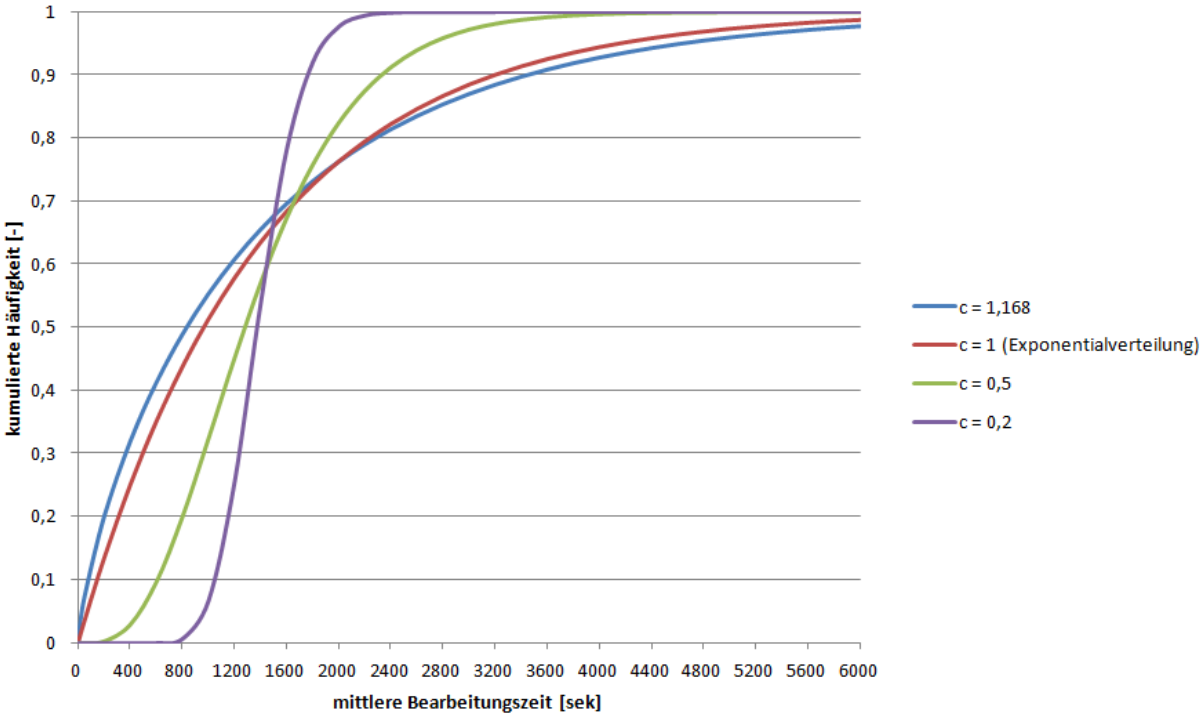


Abbildung 96: Verteilungsfunktion Gammaverteilung

7.2 Anhang Beispiel 2

Variation alle x ausgehend von unterschiedlichen Näherungen, AS 1														
A					B				C					
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{e,Los}$ [Std]	$t_{s,Los}$ [Std]	x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{s,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]	x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{s,Los}$ [Std]	$t_{e,Los}$ [Std]
11	28	308	14,67	5,25	20	13	260	32,00	7,50	14	29	406	14,00	4,50
14	22	308	18,67	6,41	26	10	260	41,60	9,30	20	20	400	20,00	6,00
17	18	306	22,67	7,57	32	8	256	51,20	11,10	26	16	416	26,00	7,50
20	15	300	26,67	8,73	38	7	266	60,80	12,90	32	13	416	32,00	9,00
23	14	322	30,67	9,89	44	6	264	70,40	14,70	38	11	418	38,00	10,50
12	25	300	16,00	5,64	14	18	252	22,40	5,70	18	23	414	18,00	5,50
18	17	306	24,00	7,96	21	12	252	33,60	7,80	27	15	405	27,00	7,75
24	13	312	32,00	10,28	28	9	252	44,80	9,90	31	13	403	31,00	8,75
30	10	300	40,00	12,60	35	8	280	56,00	12,00	37	11	407	37,00	10,25
12	26	312	16,00	5,64	16	6	96	25,60	6,30	19	22	418	19,00	5,75
18	17	306	24,00	7,96	23	6	138	36,80	8,40	27	15	405	27,00	7,75
24	13	312	32,00	10,28	30	5	150	48,00	10,50	35	12	420	35,00	9,75

Tabelle 59: Anwendung verschiedener Näherungsverfahren

$t_{a,Los,m}$	$t_{e,Los,m}$	u_m	$c_{a,Los,m}$	$\sigma_{eLos,m}$	$ce_{,Los,m}$	ZW_m	ZDL_m
5,853	5,349	0,914	1,00	1,0729463	0,2006	29,57	34,91
7,836	6,795	0,867	1,00	1,2209966	0,1797	22,89	29,68
9,793	8,220	0,839	1,00	1,4008664	0,1704	22,10	30,32
11,737	9,636	0,821	1,00	1,6011412	0,1662	22,70	32,33
13,674	11,045	0,808	1,00	1,8146842	0,1643	23,83	34,87
6,146	5,609	0,913	1,00	0,0818484	0,0146	29,26	34,87
9,220	7,844	0,851	1,00	0,0933951	0,0119	22,38	30,22
11,651	9,606	0,824	1,00	0,6806675	0,0709	22,68	32,28
14,309	11,538	0,806	1,00	1,0486495	0,0909	24,21	35,75
6,485	5,845	0,901	1,00	0,269359	0,0461	26,72	32,57
9,445	7,999	0,847	1,00	0,2521017	0,0315	22,16	30,16
12,40	10,15	0,82	1,00	0,3080199	0,03	22,92	33,07

Tabelle 60: Ergebnisse versch. Näherungsverfahren

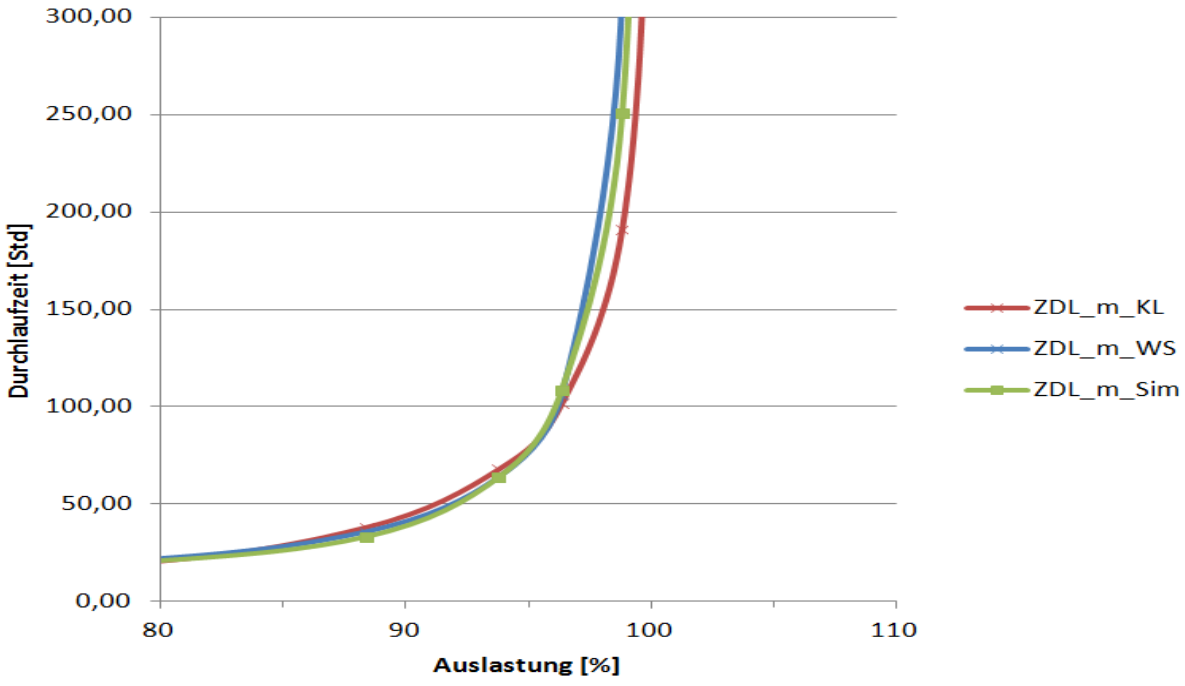


Abbildung 97: Durchlaufzeitverläufe caLosm = 1, alpha=120

7.3 Anhang Beispiel 3

Parameter AS 2											berechnete Kennzahlen AS 2					
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	u [1]	α	β	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$WL_{konvent.}$ [Std]	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$DL_{konvent.}$ [Std]
22	46	1012	8,70	0,00	8,8	0,504	0,99	3,93	8050,91	8,8	0,075782	96,18	3,68	7,55		101,15	104,88
41	25	1025	15,35	0,00	16,4	0,585	0,94	2,92	20210,49	16,4	0,2059861	38,41	7,00	14,00		45,71	53,76
20	53	1060	8,00	0,00	8	0,484	1,00	4,27	6750,00	8	0	#DIV/0!	3,33	6,65		#DIV/0!	#DIV/0!
11	91	1001	4,85	0,00	4,4	0,212	1,10	22,25	711,82	4,4	#ZAHL!	-1,17	1,75	3,50		1,88	3,68
12	84	1008	5,20	0,00	4,8	0,285	1,08	12,26	1410,00	4,8	#ZAHL!	-2,76	1,93	3,85		0,47	2,44
31	33	1023	11,85	0,00	12,4	0,557	0,96	3,23	13839,68	12,4	0,1639895	39,58	5,25	10,50		45,13	51,43

Parameter AS 3											berechnete Kennzahlen AS 3					
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	u [1]	α	β	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$WL_{konvent.}$ [Std]	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$DL_{konvent.}$ [Std]
22	46	1012	4,20	0,00	8,8	0,075	0,48	174,13	181,94	8,8	0,0665839	0,01	1,05	2,10		2,56	4,21
41	25	1025	6,10	0,00	16,4	0,205	0,37	23,57	2505,08	16,4	0,1912071	0,08	2,00	4,00		3,38	6,18
20	50	1000	4,00	0,00	8	0,000	0,50	#DIV/0!	#DIV/0!	8	0	0,00	0,95	1,90		2,25	4,00
11	91	1001	3,10	0,00	4,4	#ZAHL!	0,70	#ZAHL!	#ZAHL!	4,4	#ZAHL!	#ZAHL!	0,50	1,00		#ZAHL!	#ZAHL!
12	84	1008	3,20	0,00	4,8	#ZAHL!	0,67	#ZAHL!	#ZAHL!	4,8	#ZAHL!	#ZAHL!	0,55	1,10		#ZAHL!	#ZAHL!
31	33	1023	5,10	0,00	12,4	0,164	0,41	37,18	1200,49	12,4	0,1494773	0,05	1,50	3,00		2,85	5,15

Parameter AS 4											berechnete Kennzahlen					
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	u [1]	α	β	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$WL_{konvent.}$ [Std]	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$DL_{konvent.}$ [Std]
22	46	1012	4,30	0,00	8,8	0,067	0,49	225,49	140,99	8,8	0,0581023	0,01	1,58	3,15		2,88	4,31
41	25	1025	7,15	0,00	16,4	0,191	0,44	27,35	2158,51	16,4	0,1710784	0,10	3,00	6,00		4,40	7,25
20	50	1000	4,00	0,00	8	0,000	0,50	#DIV/0!	#DIV/0!	8	0	0,00	1,43	2,85		2,73	4,00
11	91	1001	2,65	0,00	4,4	#ZAHL!	0,60	#ZAHL!	#ZAHL!	4,4	#ZAHL!	#ZAHL!	0,75	1,50		#ZAHL!	#ZAHL!
12	84	1008	2,80	0,00	4,8	#ZAHL!	0,58	#ZAHL!	#ZAHL!	4,8	#ZAHL!	#ZAHL!	0,83	1,65		#ZAHL!	#ZAHL!
31	33	1023	5,65	0,00	12,4	0,149	0,46	44,76	997,41	12,4	0,1330589	0,05	2,25	4,50		3,60	5,70

Parameter AS 5											berechnete Kennzahlen AS 5					
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	u [1]	α	β	$t_{Lüm}$ [Std]	$c_{Lüm}$	ZW [Std]	ZWL_{split} [Std]	$WL_{konvent.}$ [Std]	ZWLB [Std]	ZDL_{split} [Std]	$DL_{konvent.}$ [Std]
22	46	1012	5,40	0,00	8,8	0,053	0,61	296,22	105,35	8,8	0,0458769	0,01	2,10	4,20		3,41	5,41
41	25	1025	13,30	0,00	16,4	0,172	0,81	33,77	1748,13	16,4	0,1006795	0,84	4,00	8,00		6,14	14,14
20	50	1000	7,00	0,00	8	0,000	0,88	#DIV/0!	#DIV/0!	8	0	0,00	1,90	3,80		3,20	7,00
11	91	1001	4,30	0,00	4,4	#ZAHL!	0,98	#ZAHL!	#ZAHL!	4,4	#ZAHL!	#ZAHL!	1,00	2,00		#ZAHL!	#ZAHL!
12	84	1008	4,60	0,00	4,8	#ZAHL!	0,96	#ZAHL!	#ZAHL!	4,8	#ZAHL!	#ZAHL!	1,10	2,20		#ZAHL!	#ZAHL!
31	33	1023	10,30	0,00	12,4	0,133	0,83	56,48	790,34	12,4	0,0740875	0,45	3,00	6,00		4,75	10,75

Tabelle 61: Durchrechnung mit stationsspezifischen "optimalen" Losgrößen

7.4 Anhang Beispiel 4

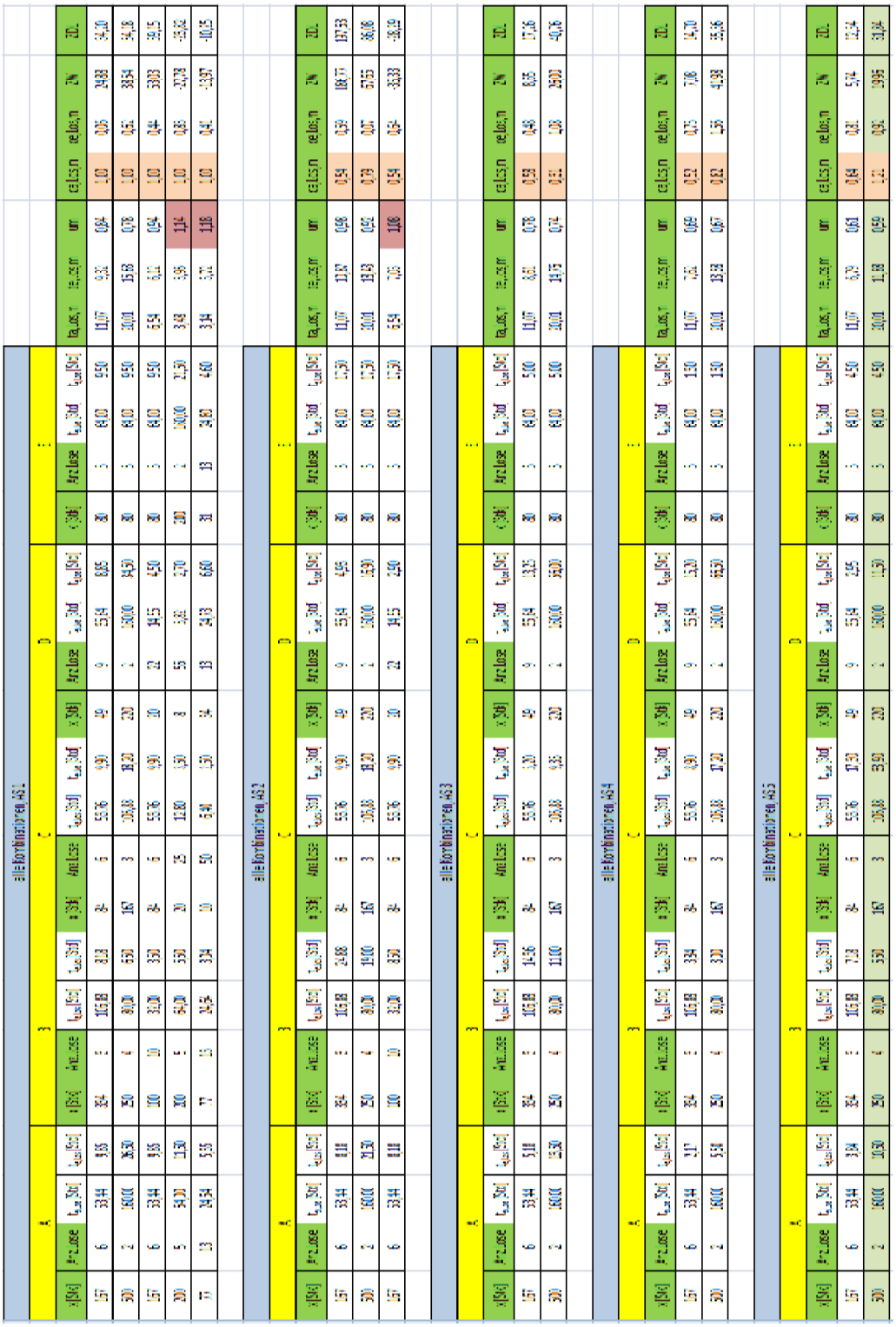


Tabelle 62: ZDA$_m$ für verschiedene Losgrößenkombinationen

Parameter AS 1												
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{e,Los}$ [Std]	$c_{e,Los}$	α	β	$t_{a,Los}$ [Std]	$c_{a,Los}$	u [1]	α	β	$t_{q,Los}$ [Std]	$c_{q,Los}$
40	25	1000	13,00	0,05	11,1111	97,20	16	1,000	0,81	1,00	57600,00	16	0,5842338
Parameter AS 2													
40	25	1000	15,00	0,05	11,1111	113,40	16	0,584	0,938	2,93	19660,56	16	0,2081114
Parameter AS 3													
40	25	1000	6,00	0,05	11,1111	32,40	16	0,208	0,38	23,09	2494,68	16	0,1937427
Parameter AS 4													
40	25	1000	7,00	0,05	11,1111	48,60	16	0,194	0,44	26,64	2162,09	16	0,1754487
Parameter AS 5													
40	25	1000	9,00	0,05	11,1111	64,80	16	0,175	0,56	32,49	1773,06	16	0,1474939

Parameter AS 1													
x [Stk]	Anz. Lose	Output	$t_{e,Los}$ [Std]	$c_{e,Los}$	α	β	$t_{a,Los}$ [Std]	$c_{a,Los}$	u [1]	α	β	$t_{q,Los}$ [Std]	$c_{q,Los}$
40	25	1000	13,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	16	1,000	0,81	1,00	57600,00	16	0,5829612
Parameter AS 2													
40	25	1000	15,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	16	0,583	0,938	2,94	19575,00	16	0,2028619
Parameter AS 3													
40	25	1000	6,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	16	0,203	0,38	24,30	2370,41	16	0,188058
Parameter AS 4													
40	25	1000	7,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	16	0,188	0,44	28,28	2037,07	16	0,1691052
Parameter AS 5													
40	25	1000	9,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	16	0,169	0,56	34,97	1647,16	16	0,1398158

Tabellen 63: Stationsdurchlaufzeiten ce=0,3 bzw ce=0

Ermittlung der Produktionskennlinien mittels der Kennlinientheorie, α=120						
t	$LA_{m,FZK}(t)$	$A_{m,FZK}$ [%]	$BA_{m,FZK}$ [1]	$ZDL_{m,FZK}$ [BKT]	$ZDL_{m,FZK}$ [Std]	
0,000001	0,1210	12,0616598	0,493	4,07	65,17	
0,00001	0,2073	20,5664176	0,845	4,08	65,23	
0,0001	0,3449	34,39	1,414	4,10	65,59	
0,001	0,5447	54,3068757	2,312	4,24	67,92	
0,01	0,7837	78,140217	4,131	5,27	84,34	
0,03	0,8864	88,3823465	6,428	7,25	116,03	
0,0625	0,9402	93,75	9,700	10,32	165,07	
0,1	0,9661	96,3310469	13,328	13,80	220,73	
0,132	0,9780	97,5098953	16,382	16,75	268,03	
0,2	0,9908	98,7958672	22,823	23,03	368,53	
0,4	1,0012	99,824321	41,652	41,60	665,66	
0,7	1,0029	99,9947057	69,841	69,64	1114,25	
1	1,0029	100	98,022	97,74	1563,78	

Produktionskennlinien mit Warteschlangentheorie, c_e =0,3					
$A_{m,FZK}$ [%]	$LA_{m,FZK}$	$ZDL_{m,FZK}$[Std]	$ZDL_{m,FZK}$ [BKT]	$BA_{m,FZK}$ [1]	
12,0617	0,1150	59,34	3,71		
20,6664	0,1970	62,60	3,91		
34,3900	0,3278	68,54	4,28		
54,3069	0,5177	79,46	4,97		
78,1402	0,7449	103,08	6,44		
88,3823	0,8425	128,30	8,02		
93,7500	0,8937	161,63	10,10		
96,3310	0,9183	203,48	12,72		
97,5099	0,9295	247,10	15,44		
98,7959	0,9418	387,14	24,20		
99,8243	0,9516	1927,14	120,45		
99,9947	0,9532	59797,48			
100,0000	0,9533				

Simulation			
$c_{e,sim}$ =1, ce = 0,3			
$t_{e,sim}$ [sek]	$ZDL_{m,FZK}$[Std]	$u_{m,sim}$	
413160	55,5	12,6	
241135	56,9	21,45	
144908	60	35,1	
91764	65,9	54,4	
63775	82,9	77,7	
56385	134,5	89,7	
53156	161,4	93,3	
51732	222	95,5	
51107	253,4	96,2	
50441	325,2	97,4	
49922	1092	98,9	
49837	1490	99,45	
49834	1551	99,6	

Tabelle 64: Ermittlung der Prozesskennlinie für ce=0,3

8 Literaturverzeichnis

Adam, D.: *Fertigungssteuerung - Grundlagen und Systeme,* Gabler Verlag, Wiesbaden, 1992

Adam, D.: *Produktionsmanagement*, 7. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1993

Aldinger, L. A.: *Methode zur strategischen Leistungsplanung in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen des Mittelstandes,* Dissertation*,* Universität Stuttgart, 2009

Al Khateeb, A. *Beitrag zur Planung und Optimierung von Fließmontagesystemen unter Berücksichtigung sich ändernder Anforderungen, insbesondere an Prozesszuverlässigkeit, Produktqualität und Flexibilität,* Dissertation, TU Ilmenau, 2013

Arnold, D.; Kuhn, A; Furmans, K.; Isermann, H.; Tempelmeier, H.: *Handbuch Logistik*, 3.Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008

Arnold, D.; Furmans, K.: *Materialfluss in Logistiksystemen*, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009

Bangsow, St.: *Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010

Bechte, W.: *Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung,* In: *Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften Reihe 2, Betriebstechnik, Nr. 70,* VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984

Bhat, U. N.: *An Introduction to Queueing Theory - Modeling and Analysis in Applications*, Birkhäuser Verlag, Boston, 2008

Bornhäuser, M.: *Reifegradbasierte Werkstattsteuerung*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2009

Corsten, H.: *Produktionswirtschaft - Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*, 11. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 2007

Corsten, H. (a): *Übungsbuch zur Produktionswirtschaft*, 3. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 2007

Dangelmaier, W.: *Vorlesungsfolien Produktionsplanung und -steuerung*, Universität Paderborn, 2014.

Dombacher, C.: *Warteschlangen,* 1994. online abgerufen am 05.04.2015 unter: http://www.telecomm.at/documents/Warteschlangen.pdf

Domschke, W.; Scholl, A.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005

Domschke, W.; Drexl, A.: *Einführung in Operations Research*, fünfte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2002

Ebel, B.: *Produktionswirtschaft*, 9. Auflage, Friedrich Kiehl Verlag, Ludwigshafen (Rhein), 2009

Engelhardt-Nowitzky, C.: *Auswirkungen von Produktivitätsmaßnahmen im Einkauf auf die Fertigungsperformance*, Vorlesungsfolien Supply Chain Management, Montan Universität Leoben, 2007

Erlach, K.: *Wertstromdesign - Der Weg zur schlanken Fabrik*, zweite Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010

Fischer, A.; Busse,T :*Losgrößenverfahren - Die optimale Losgröße im Spannungsfeld zwischen Rüstzeiten und Beständen.* Institut für Fabrikanlagen und Logistik, Universität Hannover, 2006

Francois, P.: *Flexible Losgrößenplanung in Produktion und Beschaffung*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1999

Fritz, J. U.: *Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der digitalen Fabrik*, In Bley, H.; Weber, C.: *Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 41, Universität des Saarlandes*, Saarbrücken, 2007

Gercek, E.B.: *Analyse zur Bewertung der logistischen Leistungsfähigkeit*. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2013

Goldratt, E.: *The unbalanced plant*, In: 24th APICS annual international conference, S.195-199, Boston, 1981

Goldratt, E; Cox, J..: Das Ziel - Ein Roman über Prozessoptimierung, Teil 1, Campus Verlag, Frankfurt/Main, 2013

Goldratt, E.: *What is this thing called THEORY OF CONSTRAINTS and how should it be implemented?,* 1994

Grabner, T.: *Operations Management - Auftragserfüllung bei Sach- und Dienstleistung*en, erste Auflage, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012

Großklaus, A.: *Ablauforientierte Produktionslogistik - Eine modellbasierte Analyse*, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 1996

Gutenberg, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Erster Band - Die Produktion*, 24. Auflage, Sringer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1983

Günther, H.O.; Tempelmeier, H.: *Produktion und Logistik - Supply Chain and Operations Management*, 11. Auflage, Books on Demand, Norderstedt, 2014

Haasis, H.-D.: Produktions- *und Logistikmanagement - Planung und Gestaltung von Wertschöpfungsprozessen*, erste Auflage, GWV Fachverlag, Wiesbaden, 2008

Häfner, H.: *Ein Warteschlangenansatz zur integrierten Produktionsplanung*, erste Auflage, Physica- Verlag, Heidelberg, 1992

Hopp, W.; Spearman, M.: *Factory Physics - Foundations of Manufacturing Management*, 2. Auflage, Irwin McGraw-Hill, New York, 2001

Karmarkar, U.S.; Kekre, S.; Kekre, Sh.: *Multi-item batching heuristics for minimization of queueing delays,* In*: EJOR 58*, 1992, S. 99-111

Kartnig, G.: *Technische Logistik,* Vorlesungsfolien, Technische Universität Wien, 2014

Kerner, A.: *Modellbasierte Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Prozessketten*, Dissertation, Universität Hannover, 2002

Keil, S.: *Flussorientierte Gestaltung von Produktionssystemen - Anwendung am Beispiel von Halbleiterfabriken*, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012

Kienzle, F.: *Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten*, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2011

Kistner, K.P.; Steven, M.: *Produktionsplanung,* Physica Verlag, Heidelberg, 1990

Kumpf, A.: *Anforderungsgerechte Modellierung von Materialflusssystemen zur planungsbegleitenden Simulation*, Dissertation, Technische Universität München, 2001

Kurbel, K.: *Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management, 6. Auflage, Oldenbourg Verlag, 2005*

Lasch, R.; Janker C.G.: *Übungsbuch Logistik - Aufgaben und Lösungen zur quantitativen Planung in Beschaffung, Produktion und Distribution*, erste Auflage, Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler - GWV Verlage, Wiesbaden, 2007

Lotter, B.; Wiendahl, H.P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis,* 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006

Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung - Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008

März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Wigert, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik - Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010

Missbauer, H.: *Bestandsregelung als Basis für eine Neugestaltung von PPS-Systemen*, 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1998

Nebl, T.: *Produktionswirtschaft*, 6. Auflage, Oldenbourg Verlag, München Wien, 2007.

Nyhuis, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.P.: *Logistische Kennlinien - Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012

Oßwald, J.: *Produktionsplanung bei losweiser Fertigung - Operationale Modelle zur simultanen Programm-, Ablauf- und Losgrößenplanung bei ein- und mehrstufiger Produktion*, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1979

Otto, A.; Obermeier, R. (Hrsg.): *Logistikmanagement - Analyse, Bewertung und Gestaltung logistischer Systeme*, 1. Auflage, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2007

Plakolm, A.: *Entwurf eines Analysewerkzeugs zur Identifizierung logistischer Engpasssysteme in der variantenreichen Werkstattsteuerung*. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2011

Puffer, W.: *Technisch- ökonomische Effizienzbetrachtung für die Halbleiterfertigung*, Dissertation, Technische Universität München, 2007

Recker, A.: *Losgrößenplanung in PPS- Systemen - Optimierende versus Heuristische Verfahren,* 1. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2002

Riezebos, J.: The *Design of a period batch control planning system for cellular manufacturing*, Dissertation, Print Partners Ipskamp, Enschede, 2001

Roßberg, M.: *Leistungsbewertung, Teil 2 Modellierung*, Vorlesungsfolien, Technische Universität Ilmenau, 2012

Sahling, F.: *Mehrstufige Losgrößenplanung bei Kapazitätsrestriktionen*, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2010

Schmidt, P.M.: Simulation mit Tecnomatix Plant Simulation, Vorlesungsfolien, Hochschule Esslingen, 2014

Schneeweiß, C.: *Planung 2 - Konzepte der Prozess- und Modellgestaltung*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1992

Schömig, A.; Eichhorn, D.; Obermaier, G.: *Über verschiedene Ansätze zur Ermittlung von Betriebskennlinien - Eine Anwendungsstudie aus der Halbleiterindustrie*, in: *Operations Research Proceedings 2006* (S. 467 - 472), Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007

Schönsleben, P.: *Integrales Logistikmanagement - Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*, sechste Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2011

Schuh, G.: *Produktionsplanung und -steuerung - Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Dritte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006

Söhner, V.: *Hierarchisch integrierte Produktionsplanung und -steuerung*, Physica Verlag, Heidelberg, 1995

Steinrücke, M.: *Termin-, Kapazitäts- und Materialflussplanung bei auftragsorientierter Werkstattfertigung*, 1. Auflage, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2007

Tempelmeier, H.; Günther, H.-O.: *Produktion und Logistik*. Sechste Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005

Tempelmeier, H.: *Material-Logistik - Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning- Systemen*. Sechste Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006

VDI- Richtlinie 3633: Simulation *von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*, Blatt 1, Verein Deutscher Ingenieure, 2014

Whitt, W.: *The Queueing Network Analyzer*, In: *The Bell System Technical Journal,* 63, 9, 1983, S. 1779 - 1820

Wiendahl, H.P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*, 7. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2010

Wiendahl, H.P.; Reichert, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung - Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten, Hanser Verlag, München Wien, 2009

Wiendahl, H.H.: *Auftragsmanagement in der industriellen Produktion - Grundlagen, Konfiguration, Einführung*, erste Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2011

Wiendahl, H.P. (Hrsg.): *Erfolgsfaktor Logistikqualität- Vorgehen, Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung der Logistikleistung.* Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1996

Wiendahl, H.P.: *Belastungsorientierte Fertigungssteuerung - Grundlagen, Verfahrensaufbau, Realisierung*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1987

Zäpfel, G. (Hrsg.): *Neuere Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung*, Universitätsverlag Rudolf Trauner, Linz, 1989

Zimmermann, G.: *Produktionsplanung variantenreicher Erzeugnisse mit EDV*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1988

Zimmermann, W.; Stache, U.: *Operations Research - Quantitative Methroden zur Entscheidungsvorbereitung*, zehnte Auflage, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 2001

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kriterien für den Kauf von Produkten 4
Abbildung 2: Kundenanforderungen 4
Abbildung 3: interne und externe Zielgrößen 5
Abbildung 4: Positionierung aufgrund der Kostenstruktur 5
Abbildung 5: Zielkreuz der produktionslogistischen Zielgrößen 7
Abbildung 6: Merkmale unterschiedlicher Fertigungsprinzipien 11
Abbildung 7: Werkstattprinzip 12
Abbildung 8 Planungsstufen des Produktionsmanagements 12
Abbildung 9: Planungsstufen der Produktionsprogrammplanung 13
Abbildung 10: Bestandteile der Lieferzeit 15
Abbildung 11: Systemabgrenzung 15
Abbildung 12: Kapazität und Leistung 17
Abbildung 13: Elemente der Durchlaufzeit 21
Abbildung 14: Auftragsdurchlaufzeit 22
Abbildung 15: Trichtermodell 24
Abbildung 16: Durchlaufdiagramm 26
Abbildung 17: Durchlaufdiagramm mit Durchlaufelementen 27
Abbildung 18 Ressourcen vs Auftragssicht 28
Abbildung 19: Produktionskennlinien 32
Abbildung 20: Modellierungsansätze zur Erstellung von Produktionskennlinein 33
Abbildung 21:verschiedene Ansätze zur Abbildung von Produktionsabläufen 33
Abbildung 22 Idealisiertes Durchlaufdiagramm 34
Abbildung 23: ideale vs. reale Leistungskennlinie 36
Abbildung 24 Produktionskennlinien (ermittelt mit der Kennlinientechnik) 38
Abbildung 25 Kennlinien (ermittelt anhand eines Warteschlangenmodells) 40
Abbildung 26: Erstellung von Prozesskennlinien 42
Abbildung 27: Bestandteile der Durchlaufzeit 47
Abbildung 28: Elemente des Warteschlangensystems 50
Abbildung 29: Prinzipdarstellung eines Wartesystems 51
Abbildung 30: Ankunftsverhalten 52
Abbildung 31: losweise Ankunft 52
Abbildung 32: konstante Ankunftsintervalle 52
Abbildung 33: Übergangsverhalten Produktionslinie 58
Abbildung 34: verschiedene Produktionsstrukturen 65
Abbildung 35 Serienschaltung von Arbeitsstationen 66
Abbildung 36: mehrfach durchlaufene Arbeitsstation 67

Abbildung 37: Einfluss der Losgrößen 70
Abbildung 38: Arten von Losen 71
Abbildung 39: Zusammenhang Losgröße und Durchlaufzeit 74
Abbildung 40:Elemente der Durchlaufzeit bei losweiser Bearbeitung 75
Abbildung 41: Auswirkung der Losteilung 77
Abbildung 42: mögliche Bearbeitungsdauern bei losweiser Bearbeitung und c_e = 1 79
Abbildung 43: mögliche Bearbeitungsdauern bei losweiser Bearbeitung und c_e = 2 80
Abbildung 44: mögliche Bearbeitungsdauern bei losweiser Bearbeitung und ce = 0,3 80
Abbildung 45: mittlere Prozesszeit im 2-Produkt-Fall 84
Abbildung 46: mittlere Wartezeit im 2-Produkt-Fall 85
Abbildung 47: mittlere Durchlaufzeit im 2-Produk-Fall 85
Abbildung 48: mehrstufige Linienfertigung 92
Abbildung 49: einstufige Fertigungsstruktur 93
Abbildung 50: mehrstufige Fertigungsstruktur 94
Abbildung 51:mehrstufige Losplanung 95
Abbildung 52: Gesamtdurchlaufzeit ohne Überlappung 96
Abbildung 53: Gesamtdurchlaufzeit mit Überlappung 96
Abbildung 54: Überlappungseffekt 99
Abbildung 55:opt. Losgrößen bei unterschiedlicher Auslastung 102
Abbildung 56:Beispiel 1 in Plant Simulation 107
Abbildung 57: Ergebnisse für getakteten Prozess, t_{a_Los}= konst 110
Abbildung 58: t_{a_Los}=konst, LG=20 110
Abbildung 59: Ergebnisse für getakteten Prozess, ta=konst 112
Abbildung 60: Ergebnisse für M|M|1, t_{a_Los}=konst 114
Abbildung 61:Ergebnisse für M|M|1, ta=konst 116
Abbildung 62: Durchlaufzeit bei geänderter Simulationszeit (für t_a = konst) 117
Abbildung 63: Durchlaufzeit bei geänderter Simulationszeit (für t_{a_Los}=konst) 118
Abbildung 64: Einschwingvorgang bei stochastischen Prozessen 119
Abbildung 65: Dichtefunktionen der Gammaverteilung 123
Abbildung 66: Ergebnisse für realen Prozess, t_{a_Los}=konst 126
Abbildung 67: Ergebnisse für realen Prozess, ta konst 128
Abbildung 68: Mehrproduktfall in Plant Simulation 130
Abbildung 69: partielle Optimierung Produkt A 131
Abbildung 70: Variation aller Losgrößen, $c_{a,Los,m}$ = 0 134
Abbildung 71: Variation aller Losgrößen, $c_{a_Los_m}$ = 1 136
Abbildung 72: Variation aller Losgrößen bei $c_{a,Los,m}$ = 0,3 137
Abbildung 73: Substitutionseffekt 138
Abbildung 74: mittlere Durchlaufzeit mit Warteschlangentheorie 140
Abbildung 75: Produktionskennlinien mittels WS für $c_{a_Los_m}$ = 0,3 141

Abbildung 76: Produktionskennlinien mit α = 10 144
Abbildung 77: mittlere Durchlaufzeit mit Kennlinientheorie 144
Abbildung 78: mittlere Durchlaufzeit mit Simulation 145
Abbildung 79: Gegenüberstellung der Ergebnisse 146
Abbildung 80: Gegenüberstellung mit alpha = 20 147
Abbildung 81: Produktionslinie 150
Abbildung 82: Auftragsdurchlaufzeitverlauf bei verschiedenen Losgrößen 151
Abbildung 83: Durchlaufzeitanteile 152
Abbildung 84: 5x5 Produktion 155
Abbildung 85: Durchlaufzeiten für LG - Kombinationen 1 und 2 157
Abbildung 86: mittlere Gesamtdurchlaufzeit bei Losgrößenvariation 159
Abbildung 87: mittlere Durchlaufzeiten für versch. Losgrößenkombinationen 160
Abbildung 88: mittlere Durchlaufzeit AS 3 bei versch. Losgrößenkombinationen 160
Abbildung 89: mittlere Durchlaufzeit an AS 2 für versch. Losgrößenkombinationen 161
Abbildung 90: Prozesskennlinien mittels Kennlinientheorie 163
Abbildung 91:Prozesskennlinien mittels Warteschlangentheorie 164
Abbildung 92: Gegenüberstellung der ermittelten Auftragsdurchlaufzeitkennlinien 165
Abbildung 93: Auftragsdurchlaufzeitkennlinie mit alpha = 23 166
Abbildung 94:Gegenüberstellung der ermittelten Auftragsdurchlaufzeiten bei ce = 0,3 167
Abbildung 95: elementare Bausteine von Plant Simulation 173
Abbildung 96: Verteilungsfunktion Gammaverteilung 174
Abbildung 97: Durchlaufzeitverläufe caLosm = 1, alpha=120 176

10 Formelverzeichnis

(2.1) 14
(2.2) 16
(2.3) 17
(2.4) 18
(2.5) 18
(2.6) 19
(2.7) 19
(2.8) 19
(2.9) 19
(2.10) 20
(2.11) 21
(2.12) 21
(2.13) 22
(2.14) 23
(2.15) 26
(2.16) 28
(2.17) 29
(2.18) 29
(2.19) 29
(2.20) 30
(2.21) 30
(2.22) 35
(2.23) 35
(2.24) 35
(2.25) 36
(2.26) 36
(2.27) 37
(2.28) 37
(2.29) 37
(2.30) 37
(2.31) 37
(2.32) 38
(2.33) 38
(2.34) 40
(2.35) 41
(2.36) 41

(2.37) 41
(2.38) 42
(2.39) 43
(3.1) 49
(3.2) 49
(3.3) 50
(3.4) 51
(3.5) 52
(3.6) 53
(3.7) 54
(3.8) 54
(3.9) 54
(3.10) 55
(3.11) 55
(3.12) 55
(3.13) 56
(3.14) 56
(3.15) 57
(3.16) 57
(3.17) 58
(3.18) 58
(3.19) 59
(3.20) 59
(3.21) 60
(3.22) 61
(3.23) 62
(3.24) 62
(3.25) 62
(3.26) 62
(3.27) 63
(3.28) 64
(3.29) 64
(3.30) 64
(3.31) 66
(3.32) 67
(3.33) 68
(4.1) 72
(4.2) 72
(4.3) 73

(4.4) 73
(4.5) 73
(4.6) 73
(4.7) 73
(4.8) 73
(4.9) 74
(4.10) 74
(4.11) 75
(4.12) 76
(4.13) 76
(4.14) 76
(4.15) 76
(4.16) 77
(4.17) 77
(4.18) 78
(4.19) 79
(4.20) 81
(4.21) 82
(4.22) 82
(4.23) 82
(4.24) 83
(4.25) 83
(4.26) 83
(4.27) 83
(4.28) 84
(4.29) 84
(4.30) 87
(4.31) 88
(4.32) 88
(4.33) 88
(4.34) 88
(4.35) 89
(4.36) 89
(4.37) 89
(4.38) 89
(4.39) 90
(4.40) 90
(4.41) 91
(4.42) 97

(4.43) 97
(4.44) 97
(4.45) 97
(4.46) 98
(4.47) 98
(4.48) 99
(4.49) 99
(4.50) 99
(5.1) 122
(5.2) 122
(5.3) 122

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufbau Beispiel 1 108
Tabelle 2:Eingangsdaten für $t_{a,Los}$=konst, $c_{a,Los}$= c_e =0 109
Tabelle 3: ermittelte Zeitgrößen für $t_{a,Los}$=konst, $c_{a,Los}$= c_e =0 109
Tabelle 4: Eingangsdaten t_a=konst, $c_{a,Los}$= c_e =0 111
Tabelle 5: Zeitgrößen t_a=konst, $c_{a,Los}$= c_e =0 111
Tabelle 6: Eingangsdaten M|M|1, $t_{a,Los}$=konst 113
Tabelle 7: Zeitgrößen M|M|1, $t_{a,Los}$=konst 113
Tabelle 8: Eingangsdaten M|M|1, t_a=konst 115
Tabelle 9: Zeitgrößen ta=konst, c=1 115
Tabelle 10: ZDL bei verschiedenen Simulationszeiträumen 117
Tabelle 11: Stichprobe Bearbeitungszeiten 120
Tabelle 12: Stichprobe Ankunftsintervalle 123
Tabelle 13: Eingangsdaten $t_{a,Los}$=konst 125
Tabelle 14: Zeitgrößen ta_Los=konst 125
Tabelle 15: Eingabedaten für G|G|1, ta = konst 127
Tabelle 16: Zeitgrößen für G|G|1, ta=konst 127
Tabelle 17: Eckdaten Aufträge A,B und C 129
Tabelle 18: Hilfswerte für Loßgrößenermittlung 130
Tabelle 19: "optimale" Losgrößen 130
Tabelle 20: partielle Optimierung für Produkt A 131
Tabelle 21: Ergebnisse der partiellen Optimierung 131
Tabelle 22: partielle Optimierung Produkt C 132
Tabelle 23: minimale mittlere Durchlaufzeit nach partieller Optimierung 132
Tabelle 24: "optimale" Losgrößen über verschiedene Näherungsverfahren 132
Tabelle 25: gemeinsame Variation der Losgrößen 133
Tabelle 26: Ergebnisse bei $c_{a,Los,m}$ =0 134
Tabelle 27: Ergebnisgrößen bei $c_{a_Los_m}$ = 1 135
Tabelle 28: Ergebnisgrößen bei $c_{a,Los,m}$=0,3 136
Tabelle 29: gegenläufige Variation LG A und LG C 138
Tabelle 30: Substitutionseffekt Produktmix 138
Tabelle 31: Auftragsdaten Beispiel 2 140
Tabelle 32: Daten zur Erstellung der Produktionskennlinie mit $c_{a_Los_m}$ =0,3 141
Tabelle 33: ermittelte Daten für aktuellen Betriebspunkt 143
Tabelle 34: Daten zur Erstellung der Produktionskennlinie mit α = 10 143
Tabelle 35: Auftragsdaten Produkt A 148
Tabelle 36: Hilfsgrößen für stationsoptimale Losgrößen 148

Tabelle 37: stationsoptimale Losgröße 149
Tabelle 38: Parameter Arbeitsstation 1 149
Tabelle 39: Zeitgrößen für Station 1 149
Tabelle 40: Auftragsdurchlaufzeit für LG 40 151
Tabelle 41: Durchlaufzeiten bei $c_{a,Los,m}=0$ 152
Tabelle 42: Durchlaufzeiten bei Losteilung an AS 2 153
Tabelle 43: Durchlaufzeitverkürzung durch Losteilung 153
Tabelle 44: Bearbeitungs- und Rüstzeitmatrix 154
Tabelle 45: Bedarfe 154
Tabelle 46: optimale Auslastungen 155
Tabelle 47: optimale Losgrößen je Arbeitsstation 156
Tabelle 48: optimale Losgrößenkombination AS 2 156
Tabelle 49: Ergebnisse für LG_opt_AS 2 156
Tabelle 50: auftragsdurchlaufzeitoptimale Losgrößenkombination 157
Tabelle 51: Durchlaufzeitwerte für optimale Losgrößenkombination 157
Tabelle 52: Variation der Losgrößen 158
Tabelle 53: mittlere Durchlaufzeiten für versch. Losgrößenkombinationen 159
Tabelle 54: idealer Mindestbestand und maximale Leistung der Produktionslinie 162
Tabelle 55: Bestands- und Zeitgrößen im Betriebspunkt 162
Tabelle 56: Ermittlung der Prozesskennlinien mittels der Kennlinientechnik 163
Tabelle 57: Ermittlung der Prozesskennlinien mittels der Warteschlangentheorie 164
Tabelle 58: Ermittlung der Prozesskennlinien mittels Simulationsläufen 165
Tabelle 59: Anwendung verschiedener Näherungsverfahren 175
Tabelle 60: Ergebnisse versch. Näherungsverfahren 176
Tabelle 61: Durchrechnung mit stationsspezifischen "optimalen" Losgrößen 177
Tabelle 62: $ZDA_{_m}$ für verschiedene Losgrößenkombinationen 178
Tabellen 63: Stationsdurchlaufzeiten ce=0,3 bzw ce=0 179
Tabelle 64: Ermittlung der Prozesskennlinie für ce=0,3 180

12 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
vgl.	vergleiche
etc.	et cetera
usw.	und so weiter
z.B.	zum Beispiel
Std	Stunden
BKT	Betriebskalendertag
sek	Sekunden
ISO	International Organization for Standardization
VDI	Verein Deutscher Ingenieure