

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<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/englweb/>).



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology



Fraunhofer

Diplomarbeit

Analyse zur Bewertung der logistischen Leistungsfähigkeit

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr. Kurt Matyas

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

Dipl. Wirt. Ing. Juliane Gottmann

(Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Ece Basak GERCEK

0426877 (E740)

Strohmayergasse 2/1/43

1060 Wien

Wien, im Februar 2013

Ece Basak GERCEK



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/einen Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Februar 2013

Ece Basak Gercek

Danksagung

Ich möchte mich bei Fraunhofer Austria Research GmbH und deren Mitarbeitern bedanken. Sie haben es mir ermöglicht, an ihrem Institut die vorliegende Diplomarbeit zu verfassen. Besonders hervorheben möchte ich meine Betreuerin Juliane Gottmann, die mich beim Verfassen meiner Arbeit erstklassig betreut hat, und auch Herr Matthias Pfeffer. Seitens der universitären Betreuung möchte ich mich bei Ao. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Kurt Matyas ganz herzlich bedanken.

Weiterhin gilt mein Dank meinen Kollegen sowie meinen Freunden Marc Zachmann, Kutan Demirci und Yasar Murat Cimsit für ihre kollegiale und fachliche Unterstützung. Mein größter Dank gilt meiner Familie und meinem Verlobten Onur Kayurtar für ihre mentale Unterstützung, für das entgegengebrachte Verständnis sowie für ihre stete Aufmunterung.

Kurzfassung

Für viele Unternehmen stellt sich beim weltweit wachsenden Güterangebot immer nachdrücklicher die Forderung, technisch anspruchsvolle Produkte in kundenspezifischen Varianten bei kurzen Durchlaufzeiten liefern zu können. Daher sollen Unternehmen eine Strategie der Differenzierung zur Erfüllung der individuellen Kundenwünsche und gleichzeitig eine Strategie zur marktgerechten Preisen verfolgen.¹ Als Faktoren einer erfolgreichen Strategie haben sich dabei die Größen Kosten, Qualität und Zeit durchgesetzt.² Daneben haben auch eine kurze Lieferzeit und die Liefertreue eine gleichrangige Bedeutung für den Unternehmenserfolg.

Unternehmen mit einer Kombination aus Produkten mit hohem Kundennutzen und mit hoher Logistikleistung sind im Wettbewerb besonders erfolgreich. Dafür ist die Gestaltung wirtschaftlich schlanker und logistisch leistungsstarker Produktionsprozesse erforderlich.³ Dabei hat Logistik die Aufgabe, die internen Anforderungen nach Wirtschaftlichkeit und Produktivität mit den externen Marktanforderungen nach hoher logistischer Leistung abzugleichen. Die gleichzeitige Erfüllung sowohl logistischer als auch wirtschaftlicher Ziele ist nicht im Sinne einer Gesamtoptimierung möglich, da die Optimierung gemäß einer Zielvorgabe zwangsläufig zur Verschlechterung der Zielerreichung der anderen Größen führt.⁴ Bedingt durch die zunehmende Komplexität der Produkte sowie ansteigende Anforderungen der Kunden hinsichtlich der logistischen Leistung ganzer Lieferketten ist zur Optimierung eine unternehmensübergreifende logistische Positionierung von Prozessketten notwendig. Hierzu müssen die Auswirkungen der gewählten Position auf die logistischen und wirtschaftlichen Ziele bekannt sein, um eine Beurteilung treffen zu können. Zur gezielten Veränderung der Position ist darüber hinaus die Kenntnis über das Zusammenwirken dieser Zielgrößen wichtig.⁵

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, eine Beziehung zu entwickeln, die bei der Gestaltung und Planung von Fertigungsprozessketten eingesetzt werden kann. Dadurch können Maßnahmen abgeleitet werden, welche zu einer Verbesserung der Logistikleistung der Gesamtprozesskette führen.

Schlagwörter: Produktionslogistik, Logistische Kennlinien, Produktionskennlinien

¹ Vgl. Wiendahl, 1997, S.1

² Rommel, 1995

³ Vgl. Lödding, 2008, S.1

⁴ Kerner, 2002, S. IX

⁵ Vgl. Kerner, 2002, S.2

Abstract

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	4
1.2	Aufbau der Arbeit.....	5
2	Modellierungsgrundlagen für logistische Kennlinien.....	6
2.1	Einführung.....	6
2.2	Modell der Fertigungssteuerung.....	11
2.3	Trichtermodell und Durchlaufdiagramm.....	13
2.3.1	Leistung und Auslastung.....	16
2.3.1.1	Auftragszeit und Durchführungszeit je Arbeitsvorgang.....	17
2.3.2	Bestand.....	19
2.3.3	Gewichtete Durchlaufzeit und Reichweite.....	21
2.3.4	Little`s Law.....	24
3	Logistische Zielgrößen und deren Modellierung.....	28
3.1	Logistikleistung - Externe Logistische Zielgrößen.....	31
3.1.1	Lieferzeit.....	31
3.1.2	Lieferterminabweichung und Liefertreue.....	32
3.1.3	Servicegrad.....	35
3.2	Logistikleistung - Interne Logistische Zielgrößen.....	36
3.2.1	Durchlaufzeit.....	36
3.2.2	Terminabweichung und Termintreue.....	37
3.3	Logistikkosten - Interne Logistische Zielgrößen.....	39
3.3.1	Bestand.....	39
3.3.2	Leistung und Auslastung.....	40
3.3.3	Verzugskosten.....	41
4	Ableitung der Kennlinientheorie.....	42
4.1	Durchlaufdiagramme im Überblick.....	44
4.2	Produktionskennlinien.....	46
4.2.1	Ideale Produktionskennlinien.....	53
4.2.1.1	Der ideale Mindestbestand.....	53
4.2.1.2	Die maximal mögliche Leistung.....	57

4.2.1.3 Ideale Kennlinien für Leistung und Zeitgrößen	58
4.2.2 Ableitung einer Näherungsgleichung zur Berechnung von Leistungskennlinien	61
4.2.2.1 Die C_{NORM} -Funktion zur Anpassung der Leistungskennlinien	62
4.2.2.2 Normierte Produktionskennlinien	69
4.2.2.3 Anwendungsvoraussetzungen für berechnete Produktionskennlinien	73
4.3 Lagerkennlinien.....	74
4.3.1 Die ideale Lagerkennlinie.....	79
5 Fertigungsregelung auf Basis des Trichtermodells	85
5.1 Überprüfung der Einsatzmöglichkeit von Produktionskennlinien.....	85
5.1.1 Anwendungsvoraussetzungen für Produktionskennlinien bei Werkstattfertigung und Fließfertigung.....	87
5.1.2 Anwendungsvoraussetzungen von Lagerkennlinien	89
5.2 Logistische Positionierung	90
5.3 Kennlinieneinsatz im Rahmen des Produktionscontrolling.....	96
5.4 Engpassorientierte Logistikanalyse.....	96
5.5 Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung	98
5.5.1 Allgemeines Losgrößenbestimmungsverfahren	98
5.5.2 Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung	100
5.6 Einbindung des Kundentaktes und des EPEI in die Produktionskennlinien ...	104
6 Beziehung zwischen Losgröße und Bestand	107
6.1 Szenario 1	107
6.1.1 Ausblick Szenario 1	121
6.2 Szenario 2.....	122
6.2.1 Ausblick Szenario 2	136
6.3 Szenario 3.....	137
6.3.1 Ausblick Szenario 3	151
6.4 Szenario 4.....	152
6.4.1 Ausblick Szenario 4	169
7 Zusammenfassung / Ausblick.....	170
8 Quellenverzeichnis	172
8.1 Literaturquellen	172

8.2	Internetquellen	174
9	Abbildungsverzeichnis	175
10	Formelverzeichnis	179
11	Tabellenverzeichnis	181
12	Abkürzungsverzeichnis.....	182

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Mit dem stetig steigenden globalen Produktangebot erhöht sich gleichzeitig auch der Wettbewerbsdruck auf die einzelnen weltweittätigen Unternehmen. Ein Unternehmen wird zukünftig nur dann erfolgreiche Produkte am Markt anbieten können, wenn diese sowohl technisch als auch preislich passgenau zukünftige Kundenanforderungen erfüllen können. Die wachsende Globalisierung und Vernetzung der Märkte sowie immer kürzer werdende Innovationszyklen erfordern eine dynamische Anpassung der Unternehmen an die aktuelle Marktsituation. Wissenschaftler und Unternehmer sind sich einig, dass jene Unternehmen besonders erfolgreich sind, welche aus einer Kombination aus Produkten mit hohem Kundennutzen und einer überlegenen Logistik bestehen.⁶

Um trotz sinkender Gewinnmargen auf den internationalen Märkten bestehen zu können, ist es für die Unternehmen von existentieller Bedeutung bestehende Optimierungsmöglichkeiten voll auszuschöpfen. Die wachsenden Anforderungen an Zeitmanagement, Qualität, Kosten und Flexibilität können Unternehmen nur erfüllen, indem sie die sich ständig ändernden Anforderungen als permanente Herausforderung und kontinuierlichen Prozess betrachten. Hierbei gilt es, das Produktionsprogramm hinsichtlich steigender Variantenvielfalt, kleiner werdender Losgrößen, kürzerer Lieferzeiten sowie steigenden Qualitätsansprüchen zu optimieren.

Mit der vorliegenden Arbeit sollen die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Zielgrößen in der Produktion genau betrachtet und analysiert werden. Mit Hilfe von Produktionskennlinien und Kennlinientheorie kann die Frage „Wie wirken sich Losgrößen und Bestände auf die Leistungsfähigkeit des Wertstromes aus?“ beantwortet werden. Die der Diplomarbeit zugrunde liegende Fragestellung lautet daher: „Was besagt die Kennlinientheorie?“ und „Wie kann man die Beziehung zwischen Losgröße und Bestand veranschaulichen?“. Zu diesem Zweck gilt es u. a. die Lagerkennlinientheorie näher zu betrachten und anschließend anhand von Beispielen Vergleiche anzustellen.

⁶ Vgl. Lödning, 2008, S.1

1.2 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird im Anschluss an die Einleitung in Kapitel 2 auf die Modellierungsgrundlagen für logistische Kennlinien eingegangen. Das Trichtermodell und das daraus abgeleitete Durchlaufdiagramm werden hier näher behandelt.

Die in Kapitel 2 erklärten Modellierungsgrundlagen werden nun auf logistische Zielgrößen in Kapitel 3 angewandt. Weiters wird in diesem Kapitel die Verbindung zwischen den internen und den gegenüber den Kunden wirksamen externen logistischen Zielgrößen dargestellt.

Unter Zuhilfenahme vom Trichtermodell und Durchlaufdiagramm können nun in Kapitel 4 Produktionskennlinien und Lagerkennlinien abgeleitet werden.

Abschließend wird in Kapitel 5 u. a. eine Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten der Produktionskennlinien sowie logistische Positionierung durchgeführt. Weiters werden die engpassorientierte Logistikanalyse und Losgrößenbestimmung nach verschiedenen Methoden behandelt.

Ab dem 6. Kapitel folgt die Umsetzung der theoretischen Grundlagen anhand unterschiedlicher Szenarien und dem anschließenden Vergleich untereinander. Abschließend werden im Kapitel 7 die erlangten Erkenntnisse und die aus den Szenarien resultierenden Ergebnisse zusammengefasst.

2 Modellierungsgrundlagen für logistische Kennlinien

Im Kapitel 2 werden die Zusammenhänge zwischen den im Fertigungssteuerungsmodell dargestellten Stell-, Regel- und Zielgrößen erläutert. Kapitel 2 spielt eine wichtige Rolle bei der Darstellung der Verbindung zwischen den internen logistischen und den externen logistischen Zielgrößen für das nachfolgende Kapitel 3.

2.1 Einführung

Die zentrale Aufgabe der Produktionsplanung und -steuerung besteht darin, logistische Ziele und wirtschaftliche Ziele unter Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten in immer höherem Maße zu erreichen.

Das Zielsystem lässt sich über die Begriffe „Logistikleistung“ und „Logistikkosten“ beschreiben. Die Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeiten, Bestände und Auslastung können über die Dimensionen Logistikleistung und Logistikkosten zu einem Zielsystem verknüpft werden.

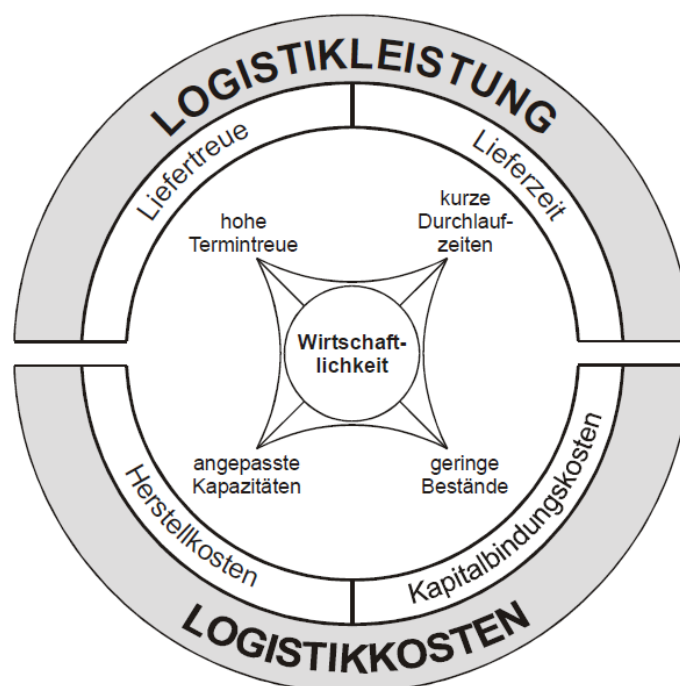


Abbildung 1: Zielsystem der PPS⁷

⁷ Quelle: Wiendahl, 2010, S.252

Aus Kundensicht sollten die Aufträge möglichst schnell durch das Unternehmen fließen, damit das Produkt möglichst rasch zur Verfügung steht. Marktseitig werden kurze Lieferzeiten und pünktliche Lieferung verlangt. Aus Sicht des Unternehmens sollen die Kapazitäten hoch und gleichmäßig ausgelastet sein, um Stillstandskosten zu vermeiden. Die Bestände sollen auch möglichst niedrig sein, um den logistischen Aufwand für die Lagerung, den Transport zu minimieren.⁸

Wegen der heutigen Marktentwicklung ist allerdings eine deutliche Verschiebung bei der Gewichtung der Zielgrößen feststellbar. Früher stand die hohe Auslastung der Maschinen eindeutig im Vordergrund. Heute werden eine kurze Durchlaufzeit und hohe Termintreue einerseits und niedrige Bestände andererseits deutlich stärker betont.⁹

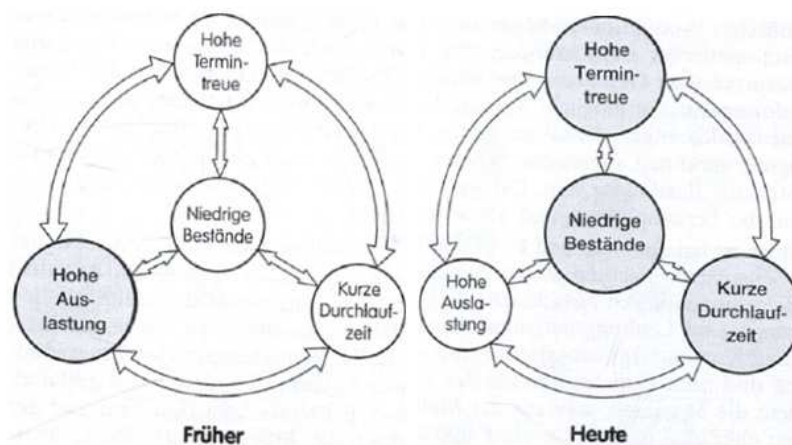


Abbildung 2: Gewichtsverschiebung bei den Zielgrößen der Fertigungssteuerung¹⁰

Kurze Durchlaufzeiten und damit kurze Lieferfristen sind nicht nur ein wettbewerbsstärkendes Argument, sondern es wird dadurch auch das Änderungsrisiko angearbeiteter Teile und Produkte gemindert. Die Wechselwirkung zwischen Durchlaufzeit und Termintreue besteht in der Weise, dass die Terminalsicherheit steigt, wenn die Durchlaufzeit sinkt.

Der Wunsch nach niedrigeren Beständen hat verschiedene Ursachen. Einerseits wollen viele Unternehmen Umlaufvermögen auszulösen, um die Eigenkapitalquote zu verbessern und Kapital für moderne Produktionseinrichtungen zu erhalten. Andererseits wird aus Erkenntnis durchgesetzt, dass hohe Bestände viele Unzulänglichkeiten im Betrieb verdecken. Tatsächlich verursachen sie aber lange Durchlaufzeiten, weil die Aufträge z. B. wegen unabgestimmten Kapazitäten oder

⁸ Vgl. Wiendahl, 2010, S.253

⁹ Vgl. Wiendahl, 1997, S.3

¹⁰ Quelle: Wiendahl, 1997, S.4

wegen störanfälligen Prozesse an den einzelnen Arbeitsplätzen immer auf lange Warteschlangen treffen.¹¹

Beispielsweise wird sich mit sinkendem Bestand auch die Durchlaufzeit der Fertigungsaufträge verringern, die Auslastung ebenfalls. Mit einer zunehmenden Auslastung sinken zwar die Stillstandskosten, dafür aber nehmen die Bestände zu. Nach Wiendahl nehmen mit einem wachsenden Bestandsniveau Mittelwert und Streuung der Durchlaufzeit zu und dies führt dazu, dass die Vorhersage der Durchlaufzeit eines einzelnen Fertigungsauftrags immer unsicherer wird. Eine unsichere Vorhersage der Durchlaufzeit wirkt sich tendentiell negativ auf die Termintreue des Fertigungsauftrags aus.

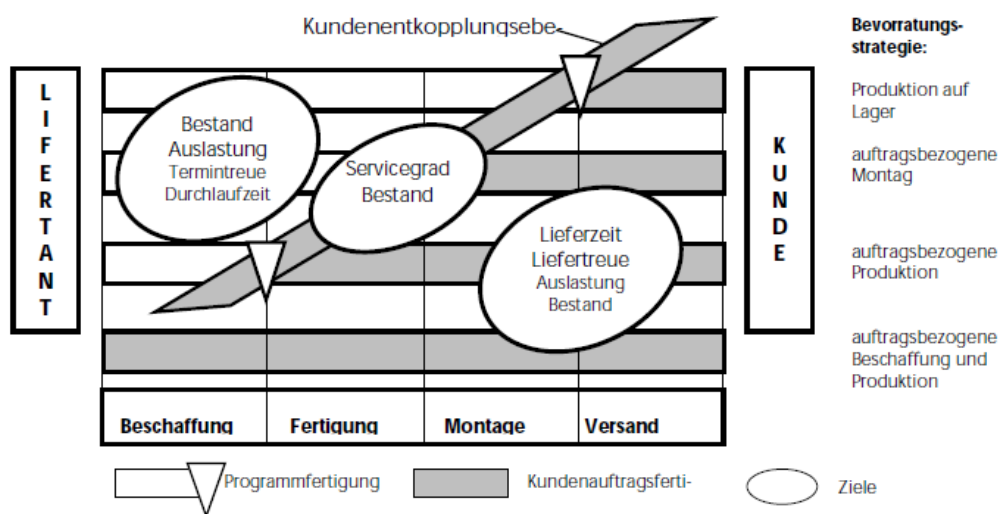


Abbildung 3: Gewichtung logistischer Zielgrößen bei unterschiedlichen Bevorratungsstrategien¹²

Aus der Konkurrenz zwischen den niedrigen Bestandskosten auf der einen Seite und einer hoher Termin- und Mengentreue auf der anderen Seite resultiert ein Zielkonflikt, welche in der Literatur auch als „*Dilemma der Ablaufplanung*“ bezeichnet wird. Dieses Dilemma ergibt sich daraus, dass es nicht möglich ist, die vier Zielgrößen wie z. B. Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung und Termintreue, gleichzeitig und unabhängig voneinander zu optimieren.¹³ Es existiert demnach prinzipiell nicht nur ein Ziel, dessen Wert es zu maximieren oder zu minimieren gilt, sondern es müssen immer die Auswirkungen von Maßnahmen auf alle Teilziele gleichzeitig berücksichtigt werden. Der Kundenentkopplungspunkt legt fest, ob es sich eher um eine Auftrags- oder Lagerproduktion handelt.¹⁴

¹¹Vgl. Wiendahl, 1997, S.3

¹²Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.4

¹³Vgl. Kerner, 2002, S.2

¹⁴Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.4

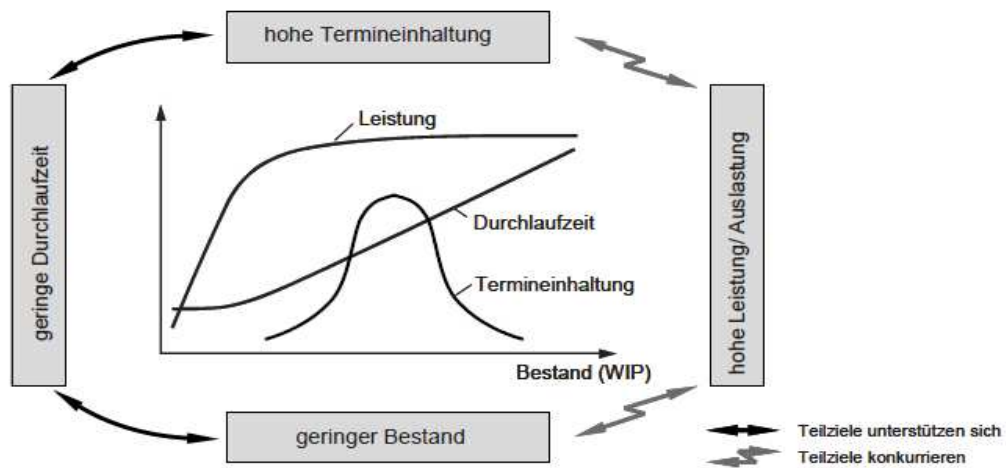


Abbildung 4: Dilemma der Ablaufplanung mit Produktionskennlinien¹⁵

Von der Abbildung 4 ist ersichtlich, dass die Leistung und die Auslastung an einem Arbeitssystem bei hohen Beständen weitgehend bestandsunabhängig sind. Wird jedoch ein bestimmter Bestandswert unterschritten, so treten Leistungseinbußen aufgrund eines zeitweilig fehlenden Arbeitsvorrates auf. Die Durchlaufzeit steigt hingegen überwiegend proportional mit wachsendem Bestand an. Jedoch kann sie ein bestimmtes Minimum nicht unterschreiten, welches sich aus der technisch bedingten Durchführungszeit bei der Auftragsbearbeitung und gegebenenfalls der Transportzeit zwischen zwei Arbeitsvorgängen ergibt. Kurze Durchlaufzeiten sind mit einer geringen Streuung verbunden. So bewirkt die Planungssicherheit eine hohe Termintreue. Mit steigenden Beständen und Durchlaufzeiten und einem Anstieg der Durchlaufzeitstreuung sinkt hingegen die Termintreue. Oder ist der Bestand so gering, dass ungeplante Leistungseinbußen entstehen, so verschlechtert sich die Termineinhaltung.¹⁶

Es werden vorrangig die betrieblichen Ziele einer hohen Auslastung und geringer Bestände verfolgt, da diese beiden Teilziele die Wirtschaftlichkeit der Produktion beeinflussen. Termintreue und Durchlaufzeit sind in diesem Fall zumeist von sekundärer Bedeutung. Die Größen beeinflussen jedoch die Ziele der Lagerhaltung. Je geringer die Termintreue und je größer die Durchlaufzeit in der vorgeschalteten Produktion sind, desto größer muss der Bestand im Lager sein, bei dem noch ein definierter Servicegrad erreicht werden kann. Bei der kundenbezogenen Produktion kehrt sich das Verhältnis der Zielgewichtungen um. Die Einhaltung der zugesagten Liefertermine ist hier deutlich stärker zu gewichten.¹⁷

¹⁵ Quelle: Nyhuis, 2008, S.188

¹⁶ Vgl. Nyhuis, 2008, S.188f

¹⁷ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.4f

Aus dem Unkenntnis der tatsächlichen Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen entsteht der Fehlerkreis der Fertigungssteuerung.

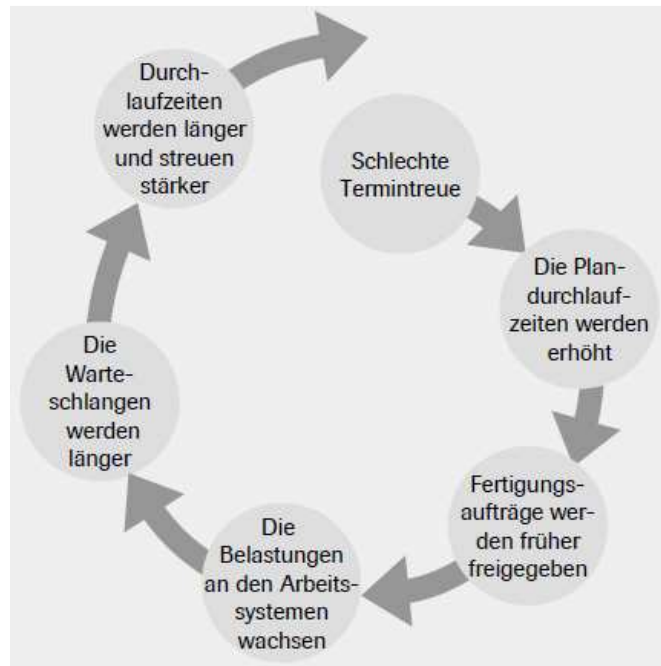


Abbildung 5: Der Fehlerkreis der Fertigungssteuerung¹⁸

Der Fehlerkreis beginnt damit, dass von der schlechten Termineinhaltung auf zu kurze Plandurchlaufzeiten geschlossen wird. In der Folge werden die planerischen Durchlaufzeiten erhöht. Als Ergebnis der Durchlaufzeiterminierung, welche mit diesen Plandurchlaufzeiten rechnet, werden die Fertigungsaufträge früher als bisher freigegeben. Dadurch steigen die Bestände an den Arbeitssystemen, da die Warteschlangen größer werden. Dies bedeutet für die Fertigungsaufträge eine längere, mittlere Liegezeit und daraus resultierend längere Durchlaufzeiten, verbunden mit einer größeren Streuung. Im Ergebnis ist die Termintreue schlechter statt besser geworden. Die Anzahl der Eilaufträge und Sonderaktionen nimmt tendentiell zu, da sich entsprechend auch mehr Fertigungsaufträge im freigegebenen Status befinden. So wird der Fehlerkreis zu einer Fehlerspirale.¹⁹

“Um einen solchen Fehlerkreis aufzubrechen und das Dilemma der Ablaufplanung durch eine aktive Prozess- und Produktionsgestaltung beherrschbar zu machen, ist es erforderlich, die wechselseitigen Abhängigkeiten der logistischen Zielgrößen sowie deren Beeinflussungsmöglichkeiten sowohl qualitativ zu erklären als auch quantitativ beschreiben zu können.“²⁰

¹⁸ Quelle: Wiendahl, 2010, S.253

¹⁹ Vgl. Wiendahl, 1997, S.7

²⁰ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.6

2.2 Modell der Fertigungssteuerung

Das Fertigungssteuerungsmodell nach Lödding hat das Ziel, die Aufgaben der Fertigungssteuerung in einen logischen Zusammenhang mit den logistischen Zielgrößen zu bringen. Das Modell besteht aus vier Elementen: den *Aufgaben der Fertigungssteuerung* sowie den *Stellgrößen*, *Regelgrößen* und *Zielgrößen*, welche durch Wirkungszusammenhänge miteinander verknüpft sind.²¹

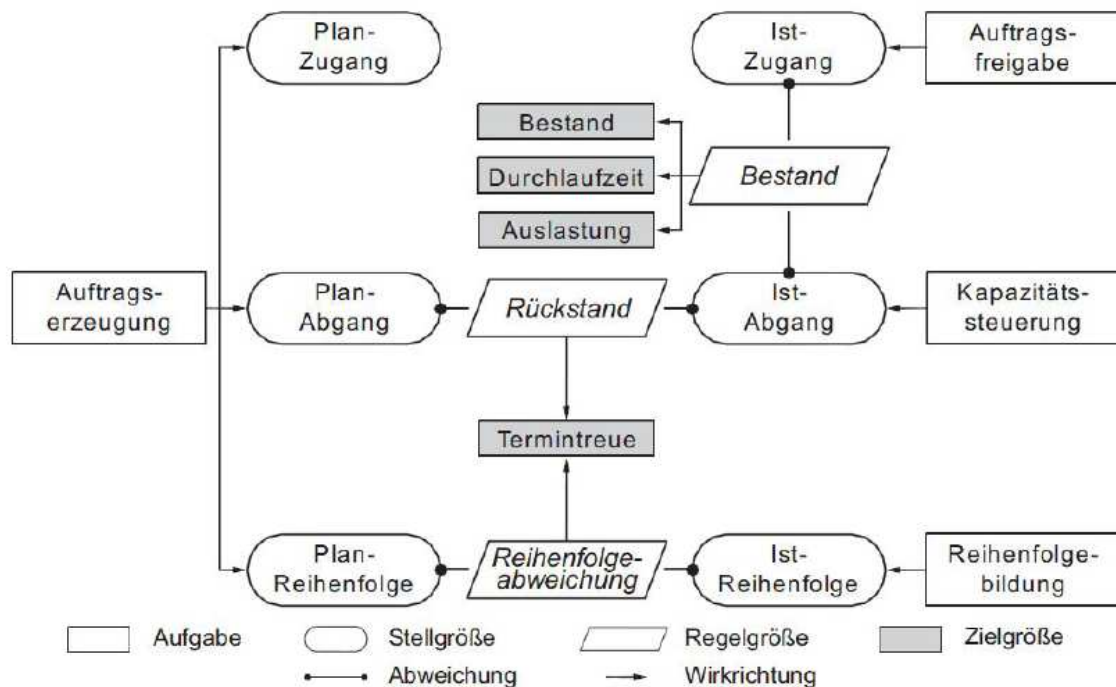


Abbildung 6: Ein Modell zur Fertigungssteuerung²²

Die Aufgaben legen die Stellgrößen fest. Durch die Abweichungen der Stellgrößen ergeben sich die Regelgrößen, welche die logistischen Zielgrößen beeinflussen.

Zur *Aufgaben der Fertigungssteuerung* gehören folgende Elemente: die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung und die Reihenfolgebildung. Die Auftragsfreigabe legt den Zeitpunkt und die Reihenfolge fest, nämlich den sogenannten Ist-Zugang. Die Kapazitätssteuerung bestimmt die Höhe der Kapazitäten in der Fertigung. Durch sie wird festgelegt, welcher Mitarbeiter wie lange an welcher Maschine arbeitet. So beeinflusst sie den Ist-Abgang der Fertigung. Die Reihenfolgebildung bestimmt, in welcher Reihenfolge die Aufträge an einem Arbeitssystem abgearbeitet werden. Die Auftragserzeugung legt die Planwerte von Zugang und Abgang der Fertigung und die Plan-Reihenfolge fest. Das Modell enthält

²¹ Vgl. Lödding, 2008, S.6f

²² Quelle: Lödding, 2008, S.7

sowohl die von der Fertigungssteuerung bestimmten Ist-Werte, als auch die von der Produktionsplanung festgelegten Planwerte.

Die *Stellgrößen* in der Fertigungssteuerung sind der Zugang und der Abgang der Fertigung und die Reihenfolge, in der die Aufträge abgearbeitet werden. Der Zugang wird als die Arbeit, die der Fertigung in Form von Aufträgen mit einer bestimmten Vorgabezeit zugeht beschrieben und kann durch den Betrag und den Zeitpunkt beschrieben werden.

Die Regelgrößen sind nach der Abweichung zwischen zwei Stellgrößen, nämlich dem Ist-Zugang und dem Ist-Abgang, definiert. Aus der Differenz von Ist-Zugang und Ist-Abgang einer Fertigung ergibt sich der Bestand der Fertigung. Beide Größen werden kumuliert über der Zeit gemessen. Die Regelgröße Bestand kann die Zielgrößen Bestand, Auslastung und Durchlaufzeiten beeinflussen. Der Rückstand entspricht der Differenz aus Plan-Abgang und Ist-Abgang. Hier werden die Stellgrößen auch kumulativ über der Zeit gemessen. Der Rückstand beeinflusst die Termintreue der Fertigung. Durch die Abweichung der tatsächlichen von der geplanten Reihenfolge kommt es zur Reihenfolgeabweichung, welche mit dem Rückstand auf die Termintreue einwirkt.

Das Modell beinhaltet die fundamentalen vier logistischen Zielgrößen: Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue.²³

“Das Modell der Fertigungssteuerung ist mit Einschränkungen verbunden:²⁴

- *Das Modell bildet keine externen logistischen Zielgrößen ab.
Es beschreibt, wie die Fertigungssteuerung und die Produktionsplanung die internen logistischen Zielgrößen beeinflussen. Die externen logistischen Zielgrößen Lieferzeit und Liefertreue sind von den internen logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit und Termintreue gegebenenfalls durch Lieferzeitpuffer oder andere Zeitanteile entkoppelt.*
- *Das Modell bildet nur einen Teil der Wirkungszusammenhänge ab.
Es beschränkt sich darauf, die starken Abhängigkeiten abzubilden. Die schwachen Abhängigkeiten werden durch dieses Modell nicht abgebildet.
Zum Beispiel, die Reihenfolge beeinflusst die Leistung und damit den Abgang der Fertigung.*
- *Das Modell bildet keine quantitativen Zusammenhänge ab.*

²³ Vgl. Lödding, 2008, S.7f

²⁴ Lödding, 2008, S.9f

Obwohl alle dargestellten Abhängigkeiten auf quantitativen Zusammenhängen beruhen, beschreibt das Modell selbst nur die qualitativen Zusammenhängen. Es wird deswegen um das Hannoveraner Trichtermodell ergänzt.

- *Das Modell enthält nicht alle Aufgaben der Fertigungssteuerung. Das Aachener PPS-Modell ordnet der Fertigungssteuerung weitere Aufgaben zu. Für die logistische Zielerreichung bedeutend ist insbesondere die Arbeitsverteilung.”*

Das Modell kann für viele Zwecke eingesetzt werden wie z. B. Analyse mangelnder Zielerreichung, Gestaltung einer Fertigungsregelung, Aufbau eines Systemverständnisses der Fertigungssteuerung oder Unterscheidung zwischen Planung und Steuerung.²⁵

2.3 Trichtermodell und Durchlaufdiagramm

Eine Fertigungsprozesskette und die von ihr erreichbare Logistikleistung wird durch die gegenseitigen Wechselwirkungen verschiedener Einflußgrößen beeinflusst. Aufgrund der Vielfalt der in der betrieblichen Realität wirkenden Prozesse und Abläufe, sowie externer und interner Einflußfaktoren, sind Zusammenhänge jedoch nicht ohne weiteres beschreibbar. Um die gegenseitige Wechselwirkung der Einflussgrößen und ihre Auswirkung auf die logistischen Ziele begreifbar zu machen, müssen Modelle eingesetzt werden, mit denen sich die Produktionsabläufe transparent darstellen und bewerten lassen. Nur bei Verwendung eines geeigneten Modells ist es möglich, die komplexen betrieblichen Abläufe und ihre Abhängigkeiten zu verstehen und so eine kontinuierliche Ausrichtung der Prozesse auch bei veränderten Zielsetzungen zu ermöglichen.²⁶ Die mit der Durchführung des Fertigungsprozesses und der Prozesse der Produktionslogistik verbundenen Kosten sollen dem Modell zuordenbar sein. Deswegen muss das Modell geeignet sein, einen funktionalen Zusammenhang zwischen Kosten und logistischen Zielgrößen abzubilden.²⁷ Zur ressourcenorientierten Darstellung von Produktionsprozessen eignet sich *das Trichtermodell* und *das daraus abgeleitete Durchlaufdiagramm*. Sie sind ein in der Fachwelt anerkanntes Modell zur Beschreibung von Produktionsprozessen und sind am Institut für Fabrikanlagen der Universität Hannover entwickelt worden.

²⁵ Vgl. Lödding, 2008, S.9

²⁶ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.6

²⁷ Vgl. Kerner, 2002, S.10

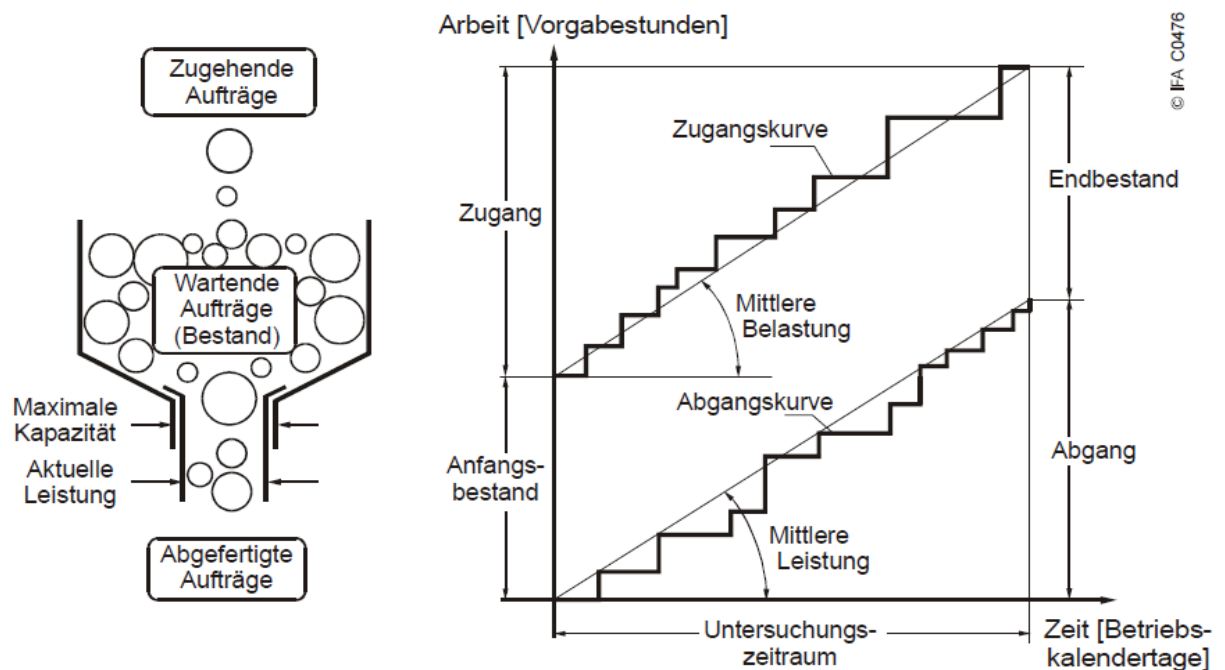


Abbildung 7: Trichtermodell und das Durchlaufdiagramm²⁸

Beim Trichtermodell wird in Analogie zur Abbildung verfahrenstechnischer Fließprozesse das Durchlaufverhalten der einzelnen Arbeitssysteme mittels der Größen Zugang, Bestand und Abgang beschrieben. Jede Kapazitätseinheit lässt sich als Trichter darstellen. Die am Arbeitssystem ankommenden Aufträge bilden mit den schon am Arbeitssystem vorliegenden Aufträgen einen Bestand an wartenden Aufträgen. Diese fließen nach der Bearbeitung durch die untere Trichteröffnung ab. Die verschiedenen Kreise symbolisieren Aufträge mit unterschiedlichen Auftragszeiten. Die Trichteröffnung symbolisiert dabei die Leistung. Die Geschwindigkeit, wie schnell die Aufträge abgearbeitet werden, hängt von der aktuellen Leistung des Arbeitssystems ab.²⁹

Wenn man das Arbeitssystem über einen längeren Zeitraum, den sogenannten Bezugszeitraum, hinsichtlich der zugehenden und abgefertigten Aufträge beobachtet, lässt sich das Ergebnis in Form von Kurven abbilden, d. h. die Zusammenhänge am Trichtermodell lassen sich in das sogenannte Durchlaufdiagramm übertragen.³⁰ Die Zugangskurve entsteht dadurch, dass man zunächst den Bestand an Arbeit feststellt, der sich zu Beginn des Bezugszeitraums in diesem Arbeitssystem befindet (Anfangsbestand). Von diesem Punkt ausgehend, trägt man die zugehende Arbeit je Auftrag entsprechend dem Arbeitsinhalt in Stunden und dem Zeitpunkt des Zugangs

²⁸ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.25

²⁹ Vgl. Elers, 2001, S.10

³⁰ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.25

bis zum Ende des Bezugszeitraums kumulativ auf und erhält so den Zugangsverlauf. Analog dazu entsteht der Abgangsverlauf in der Weise, dass man die abgefertigten Aufträge mit ihrem Stundeninhalt entsprechend den Abmeldezeitpunkten aufsummiert, beginnend am Koordinatennullpunkt. Am Ende des Bezugszeitraums ergibt sich wiederum ein bestimmter Bestand (Endbestand). Die mittlere Steigung der Zugangskurve heißt mittlere Belastung, die mittlere Steigung der Abgangskurve mittlere Leistung. Wenn man den Endbestand gleich dem Anfangsbestand des folgenden Bezugszeitraumes setzt, erweist sich das Durchlaufdiagramm als Ausschnitt aus der kontinuierlichen Beschreibung eines Arbeitssystems.³¹

“Bei Abbildung 8 sehen wir in prinzipieller Form zwei zufällig verlaufende Zugangs- und Abgangskurven, die über der Zeitachse aufgetragen sind. Man kann sich vorstellen, dass jeweils zum Ende des Bezugszeitraums das Koordinatensystem neu fixiert wird; die Zugangs- und Abgangskurven wandern wie durch ein Fenster. Die Summe der im Bezugszeitraum aufgezeichneten zugehenden Auftragsstunden wird als Zugang, die Summe der abgehenden Aufträge als Abgang bezeichnet. Die Darstellung ist völlig offen, ob es sich bei der durchfließenden Arbeit um den Arbeitsinhalt einzelner Arbeitsgänge eines Fertigungsauftrages, kompletter Fertigungsaufträge oder ganzer Baugruppen oder Erzeugnisse handelt.”³²

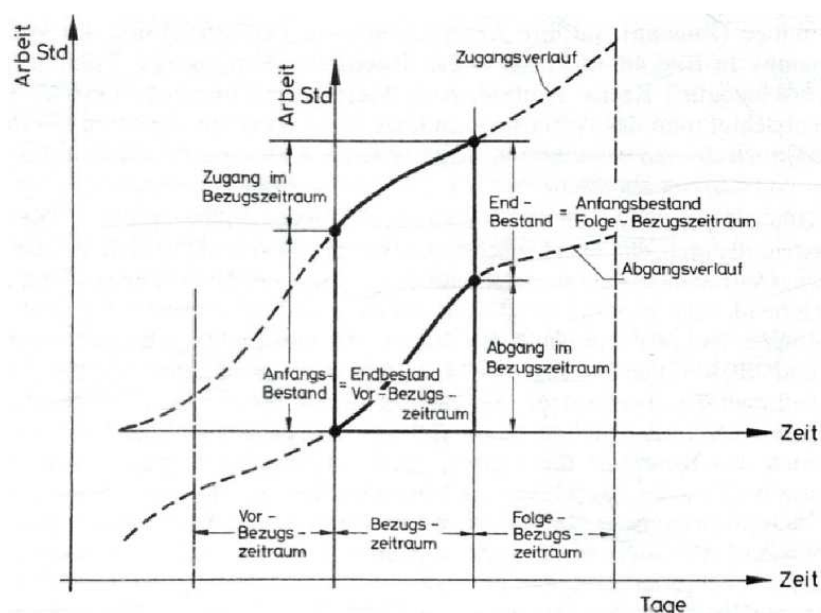


Abbildung 8: Prinzipielles Durchlaufdiagramm eines Arbeitssystems³³

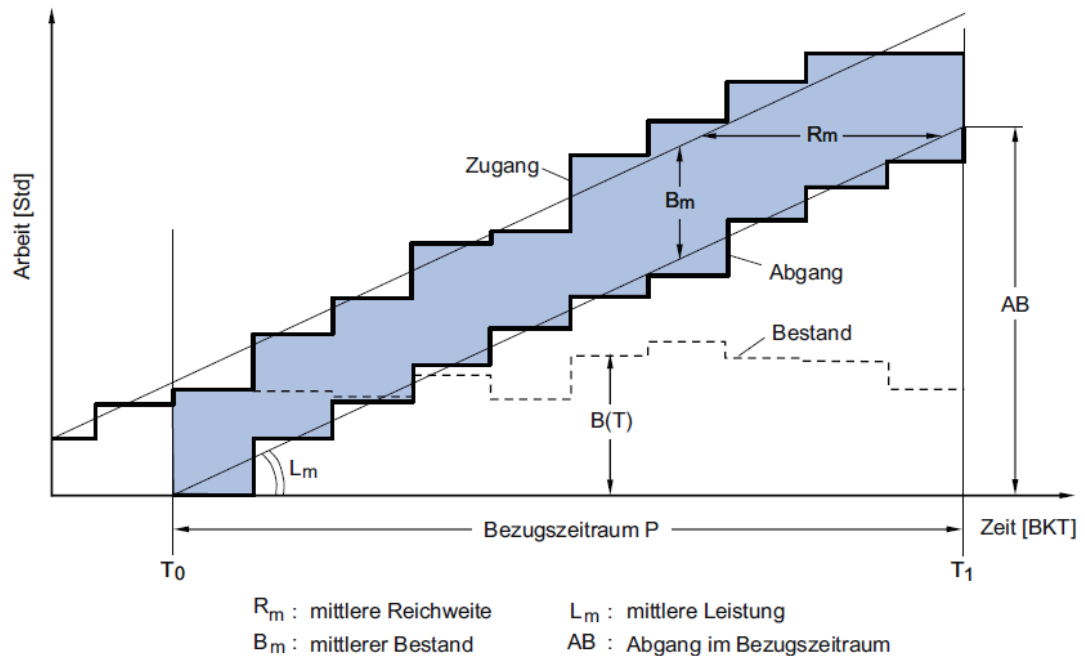
³¹ Vgl. Wiendahl, 1997, S.83

³² Wiendahl, 1997, S.84f

³³ Quelle: Wiendahl, 1997, S.84

Das Durchlaufdiagramm beschreibt das dynamische Systemverhalten qualitativ und zeitpunktgenau. Es zeigt die Wirkungszusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen auf und macht sie einer mathematischen Beschreibung zugänglich.³⁴

2.3.1 Leistung und Auslastung



IFA D1383

Abbildung 9: Bestand, Reichweite und Leistung im Durchlaufdiagramm³⁵

Neben dem Zugang und Abgang der Aufträge ist auch die mittlere Leistung sowie der Bestandsverlauf im Bezugszeitraum eingetragen.

Die mittlere Leistung L_m ergibt sich aus dem Verhältnis der geleisteten Arbeit AB und der Länge des Bezugszeitraumes P . Die geleistete Arbeit entspricht der Summe der im Bezugszeitraum zurückgemeldeten Arbeitsinhalte AB , so dass gilt:

$L_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_i}{P}$	(2.1) Mittlere Leistung
--------------------------------------	-------------------------

Mit L_m Mittlere Leistung [Std/BKT]

ZAU_i Auftragszeit je Arbeitsvorgang [Std]

n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge [-]

³⁴ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.25

³⁵ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.26

P Länge des Bezugszeitraumes [BKT]

2.3.1.1 Auftragszeit und Durchführungszeit je Arbeitsvorgang

Die Auftragszeit ZAU bedeutet die Vorgabezeit, die für die Ausführung eines Arbeitsvorganges an einem Arbeitssystem vorgesehen ist. Sie ergibt sich aus der Rüstzeit je Los, der Einzelzeit je Mengeneinheit und der Losgröße:³⁶

$ZAU = \frac{(x \cdot t_e + t_r)}{60}$	(2.2) Auftragszeit eines Arbeitsvorganges
--	---

Mit ZAU Auftragszeit eines Arbeitsvorganges [Std]

x Losgröße in Mengeneinheiten [ME]

t_e Einzelzeit je Mengeneinheit [min/ME]

t_r Rüstzeit je Los [min]

$R_m = \frac{FB}{AB} \Rightarrow L_m = \frac{AB}{P} \text{ und } B_m = \frac{FB}{P} \Rightarrow R_m = \frac{B_m}{L_m}$	(2.3) Mittlere Reichweite
--	---------------------------

Mit R_m mittlere Reichweite

L_m mittlere Leistung

B_m mittlerer Bestand

AB Abgang im Bezugszeitraum

FB Bestandsfläche [Std.BKT]

Die Auftragszeiten an einem Arbeitssystem nehmen in der betrieblichen Praxis sehr unterschiedliche Werte an. Zur allgemeinen Charakterisierung von Auftragszeitverteilungen sind besonders der Mittelwert und die Standardabweichung geeignet.³⁷

³⁶ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.17

³⁷ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.18

Der Mittelwert der Auftragszeit berechnet sich gemäß der Formel (2.4).³⁸

$ZAU_m = \frac{(\sum_{i=1}^n ZAU_i)}{n}$	(2.4) Mittlere Auftragszeit
--	-----------------------------

Mit ZAU_m Mittlere Auftragszeit [Std]

ZAU_i Individuelle Auftragszeit je Arbeitsvorgang [Std]

n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge [-]

Die Standardabweichung beschreibt die Streubreite einer Verteilung und wird aus der Formel (2.5) errechnet.³⁹

$ZAU_s = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n (ZAU_m - ZAU_i)^2)}{n}}$	(2.5) Standardabweichung der Auftragszeit
---	---

Mit ZAU_s Standardabweichung der Auftragszeit [Std]

ZAU_m Mittlere Auftragszeit [Std]

ZAU_i Individuelle Auftragszeit je Arbeitsvorgang [Std]

n Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge [-]

“Um die Variabilität von verschiedenen Verteilungen vergleichen zu können, ist die Bestimmung des Variationskoeffizienten hilfreich. Dieses relative dimensionslose Maß setzt die Streuung einer Verteilung zu deren Mittelwert ins Verhältnis.”⁴⁰

$ZAU_v = \frac{ZAU_s}{ZAU_m}$	(2.6) Variationskoeffizient der Auftragszeit
-------------------------------	--

Mit ZAU_v Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

ZAU_s Standardabweichung der Auftragszeit [Std]

³⁸ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.18

³⁹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.19

⁴⁰ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.19

ZAU_m Mittlere Auftragszeit [Std]

Die Auftragszeit wird in der Dimension Vorgabestunden angegeben. Es ist jedoch erforderlich, die Dauer der Arbeitssystembelegung in der Dimension Betriebskalendertag anzugeben. Diese als Durchführungszeit bezeichnete Kennzahl wird berechnet, indem die Auftragszeit durch die maximal mögliche Leistung des Arbeitssystems dividiert wird:⁴¹

$ZDF = \frac{ZAU}{L_{max}}$	(2.7) Durchführungszeit
-----------------------------	-------------------------

Mit ZDF Durchführungszeit (Arbeitsvorgang) [BKT]

ZAU Auftragszeit eines Arbeitsvorganges [Std]

L_{max} Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

Die Auslastung des Systems wird als das Verhältnis der mittleren Leistung und der möglichen Leistung definiert:⁴²

$A_m = \frac{L_m}{L_{max}} \cdot 100$	(2.8) Mittlere Auslastung
---------------------------------------	---------------------------

Mit A_m Mittlere Auslastung [%]

L_m Mittlere Leistung [Std/BKT]

L_{max} Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

2.3.2 Bestand

Der Bestand als vertikaler Abstand zwischen der Zugangs- und der Abgangskurve entspricht dem Arbeitsinhalt der auf die Bearbeitung wartenden und in Bearbeitung befindlichen Aufträge.

“Der mittlere Bestand ergibt sich, indem man die Bestandsfläche FB durch den Bezugszeitraum P dividiert. Die Bestandsfläche wird berechnet, indem die Differenz

⁴¹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.19

⁴² Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.27

der Flächeninhalte unter der Zugangskurve und unter der Abgangskurve bestimmt wird.“⁴³

$B_m = \left(\int_{T_0}^{T_1} ZU(T) dt - \int_{T_0}^{T_1} AB(T) dt \right) / (T_1 - T_0)$	(2.9) Mittlerer Bestand
--	-------------------------

Mit B_m mittlerer Bestand (Vorgabestunden) [Std]

$ZU(T)$ Zugang (kumulierter Arbeitsinhalt der zugehenden Arbeitsvorgänge über der Zeit) [Std]

$AB(T)$ Abgang (kumulierter Arbeitsinhalt der abgehenden Arbeitsvorgänge über der Zeit) [Std]

T_0 Beginn des Bezugszeitraumes [-]

T_1 Ende des Bezugszeitraumes [-]

Nyhuis hat festgestellt, dass es hinreichend ist, wenn die Rückmeldung eines Arbeitsvorganges innerhalb diskreter Zeitabschnitte geschieht. So erfolgen die Rückmeldungen üblicherweise zum Ende einer Arbeitsschicht oder eines Arbeitstages. In diesen Fällen vereinfacht sich die Berechnung des mittleren Bestandes deutlich. Er kann über die Summe der Einzelbestände pro Zeitabschnitt, dividiert durch die Anzahl der Zeitabschnitte berechnet werden.⁴⁴

$B_m = \frac{\left(\sum_{T=T_0}^{T_1} B(T) \right)}{Z}$	(2.10) Mittlerer Bestand
--	--------------------------

Mit B_m mittlerer Bestand (Vorgabestunden) [Std]

$B(T)$ Bestand im Zeitabschnitt T [Std]

Z Anzahl der Zeitabschnitte im Bezugszeitraum [-]

Wie aus Abbildung 9 auf Seite 16 anschaulich gemacht wird, ist das Verhältnis der Bestandsfläche zum Abgang bzw. des mittleren Bestandes zur mittleren Leistung gleich der mittleren Reichweite des Bestandes. Die Formel wird als Trichterformel bezeichnet.⁴⁵

⁴³ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.27

⁴⁴ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.28

⁴⁵ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.28

$R_m = \frac{FB}{AB} = \frac{B_m}{L_m}$	(2.11) Mittlere Reichweite als Trichterformel
---	---

Mit R_m mittlere Reichweite des Bestandes [BKT]

FB Bestandsfläche [Std.BKT]

AB Abgang im Bezugszeitraum [Std]

B_m mittlerer Bestand [Std]

L_m mittlere Leistung [Std/BKT]

2.3.3 Gewichtete Durchlaufzeit und Reichweite

Zur Darstellung der Durchlaufzeit wird in das Durchlaufdiagramm neben der Zugangs- und Abgangskurve zusätzlich für den fertiggestellten Arbeitsgang das dazugehörige Durchlaufelement eingetragen. Durch das Durchlaufelement lassen sich Aussagen über das Abfertungsverhalten an einem Arbeitssystem treffen. Bei einer strengen Abfertigung der Aufträge nach dem FIFO-Prinzip liegen die Durchlaufelemente genau zwischen der Zugangs- und Abgangskurve. Wenn die Reihenfolge der Abfertigung an dem Arbeitssystem vertauscht wird, wird es dadurch ersichtlich, dass der Beginn der Durchlaufelemente mehr oder weniger stark von der Zugangskurve abweicht.⁴⁶

Einzelne Aufträge werden an dem System unmittelbar nach dem Zugang abgearbeitet, während andere Aufträge sehr lange Durchlaufzeiten aufweisen.⁴⁷

⁴⁶ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.28

⁴⁷ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.29

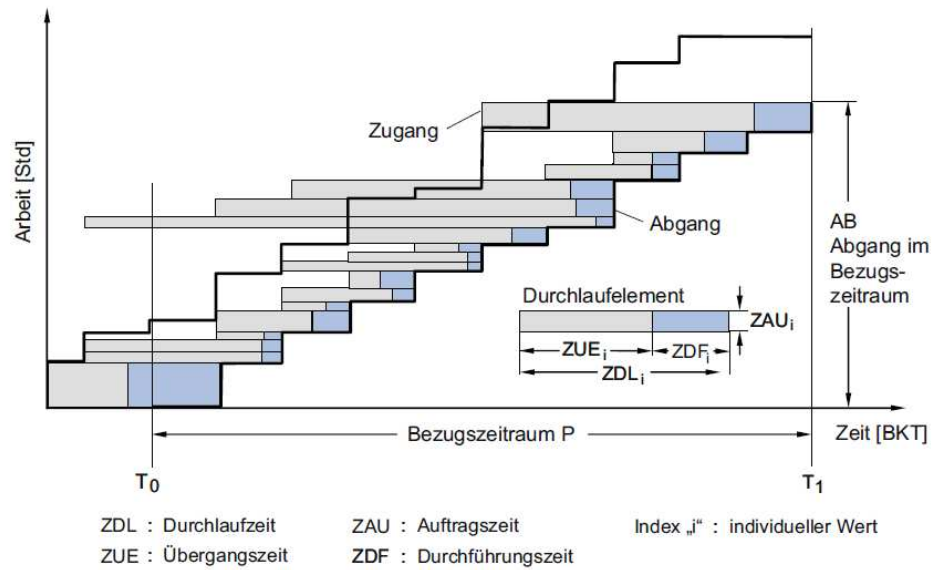


Abbildung 10: Darstellung von Durchlaufelementen im Durchlaufdiagramm⁴⁸

Die Durchlaufelemente weisen eine zweite Dimension auf, wobei es in der horizontalen Richtung durch den Zugangstermin und den Abgangstermin des Auftrages gebildet ist und in der vertikalen Richtung durch den Arbeitsinhalt der Aufträge. Durch die Gewichtung der Arbeitsaufträge entstehen für jeden abgearbeiteten Arbeitsvorgang Flächenelemente, die in ihrer Summe die Durchlaufzeitfläche FZ ergeben. Wird diese Fläche ähnlich wie bei der Berechnung der Reichweite über die Summe der abgehenden Arbeitsinhalte ins Verhältnis gesetzt, so ergibt sich daraus der gewichtete Mittelwert der Durchlaufzeit.⁴⁹

$ZDL_{mg} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZDL_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i}$	(2.12) Mittlere gewichtete Durchlaufzeit
--	--

- Mit
- ZDL_{mg} mittlere gewichtete Durchlaufzeit [BKT]
 - ZDL_i Durchlaufzeit je Arbeitsvorgang [BKT]
 - ZAU_i Auftragszeit je Arbeitsvorgang [Std]

Nach Nyhuis lassen sich wichtige mathematische Beziehungen zwischen dem arithmetischem Mittelwert der Durchlaufzeit, dem gewichteten Mittelwert und der Reichweite ableiten. Unter der Voraussetzung eines gleichbleibendes Bestands-

⁴⁸ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.29

⁴⁹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.29

Leistungsverhältnisses und der damit gegebenen Parallelität der Zugangs- und Abgangskurve sowie eines vernachlässigbaren Einflusses von Reihenfolgevertauschungen auf die Durchlaufzeitfläche FZ, entspricht die Durchlaufzeitfläche FZ der Bestandsfläche FB. Dann gilt:⁵⁰

$$R_m = ZDL_{mg}$$

(2.13) Mittlere Reichweite

Mit R_m mittlere Reichweite [BKT]

ZDL_{mg} mittlere gewichtete Durchlaufzeit [BKT]

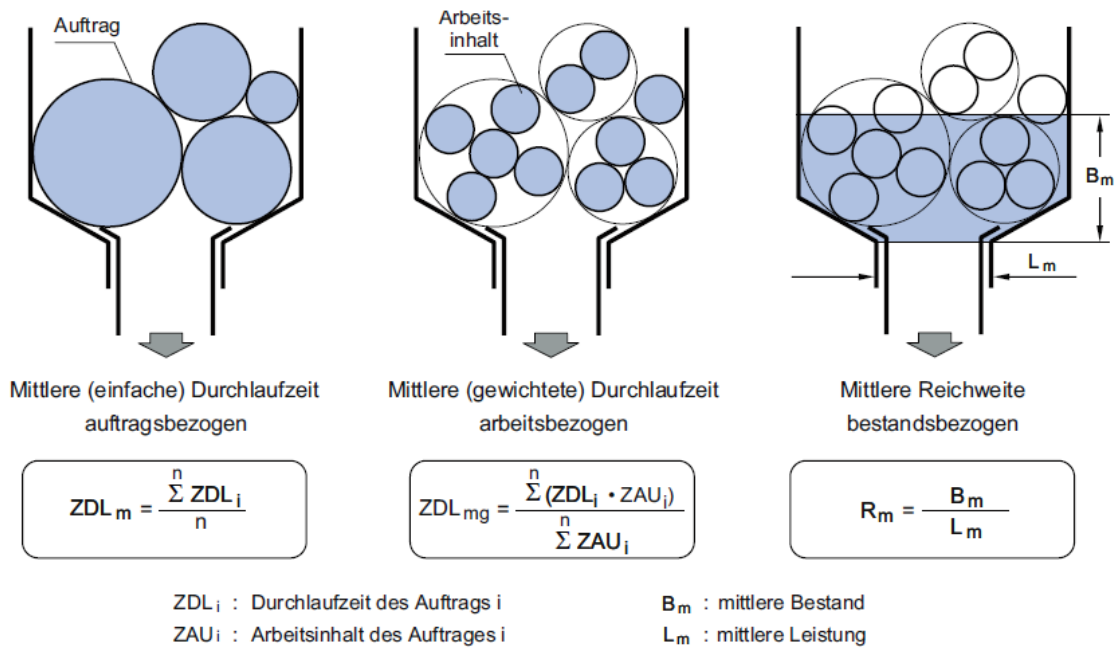
Bei der Berechnung der mittleren ungewichteten Durchlaufzeit wird die Anzahl der Aufträge als Basis genommen. Diese gibt an, wie lange sich im Mittel ein Auftrag an einem Arbeitssystem aufgehalten hat.

Bei der mittleren gewichteten Durchlaufzeit und der Reichweite hingegen wird der Bestand in die Berechnung des jeweiligen Durchlaufzeitkennwertes einbezogen. Hier wird der Auftragsbezug durch die zusätzliche Betrachtung der Arbeitsinhalte erweitert. Bei der mittleren Reichweite besteht hingegen kein unmittelbarer Bezug zu den einzelnen Aufträgen.

Weil sowohl der Bestand als auch die Leistung aus den Arbeitsinhalten der Aufträge entstehen, müssen sich die Kennwerte für die mittlere gewichtete Durchlaufzeit und für die mittlere Reichweite bei einem eingeschwungenen System und langen Betrachtungszeiträumen weitgehend entsprechen.⁵¹

⁵⁰ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.30

⁵¹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.31



IFA D1360

 Abbildung 11: Gegenüberstellung zentraler Durchlaufzeitkennwerte an einem Arbeitssystem⁵²

2.3.4 Little`s Law

Little`s Law ist ein starke Ähnlichkeit zum Trichtermodell aufweisendes Modell, welches besonders in der Warteschlangentheorie eingesetzt wird. Es zeigt, dass sich die mittlere Durchlaufzeit an einem Arbeitssystem durch die Division der mittleren Anzahl an dem System befindlichen Aufträge N_m durch die mittlere Ankunftsrate λ berechnen lässt.⁵³

$F_m = \frac{N_m}{\lambda}$	(2.14) Mittlere Durchlaufzeit
-----------------------------	-------------------------------

Mit F_m mittlere Durchlaufzeit [BKT]

N_m mittlere Anzahl der Aufträge im System [-]

λ mittlere Ankunftsrate (Aufträge/Betriebskalendertag) [1/BKT]

⁵² Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.32

⁵³ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.32

Die mittlere Leistung U_m einer Arbeitsstation ergibt sich gemäß dieser Formel:⁵⁴

$U_m = \frac{\lambda \cdot p_m}{m}$	(2.15) Mittlere Leistung einer Arbeitsstation
-------------------------------------	---

Mit U_m mittlere Leistung einer Arbeitsstation [Std/BKT]

λ mittlere Ankunftsrate [1/BKT]

p_m mittlere Auftragszeit [Std]

m Anzahl paralleler Arbeitsstationen innerhalb eines Arbeitssystems [-]

Durch Einsetzen der Gleichung (2.15) in die Gleichung (2.14) ergibt sich die mittlere Durchlaufzeit:⁵⁵

$F_m = \frac{N_m \cdot p_m}{U_m \cdot m}$	(2.16) Mittlere Durchlaufzeit
---	-------------------------------

Um den Vergleich zwischen Little`s Law und der Trichterformel zu erleichtern, sollen die Dimensionsangaben zugrundegelegt werden. Die Variable F_m wird nicht durch ZDL_m ersetzt, weil diese Gleichung das arithmetische Mittel der Einzeldurchlaufzeiten ist. Die Gleichung (2.16) basiert nicht auf Einzelereignissen, sondern auf mehreren Mittelwerten, sodass eher ein virtueller Mittelwert dargestellt wird. Deswegen wird die Größe mittlere virtuelle Durchlaufzeit ZDL_{vir} eingeführt.⁵⁶

$$F_m \rightarrow ZDL_{vir}$$

$$N_m \rightarrow BA_m$$

$$P_m \rightarrow ZAU_m$$

$$U_m \cdot m \rightarrow L_m$$

So kann die Gleichung (2.16) wie folgt geschrieben werden:

⁵⁴ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.32

⁵⁵ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.33

⁵⁶ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.33

$ZDL_{vir} = \frac{BA_m \cdot ZAU_m}{L_m}$	(2.17) Virtuelle Durchlaufzeit
--	--------------------------------

Die mittlere Leistung eines Systems kann man auch über das Produkt aus der mittleren Auftragszeit und der mittleren Anzahl der pro Betriebskalendertag fertiggestellten Aufträge LA_m beschreiben.

$L_m = LA_m \cdot ZAU_m$	(2.18) Mittlere Leistung
--------------------------	--------------------------

Mit L_m mittlere Leistung [Std/BKT]

LA_m mittlere Anzahl der fertiggestellter Aufträge [1/BKT]

ZAU_m mittlere Auftragszeit [Std]

$ZDL_{vir} = \frac{BA_m}{LA_m}$	(2.19) Mittlere virtuelle Durchlaufzeit
---------------------------------	---

Mit ZDL_{vir} mittlere virtuelle Durchlaufzeit [BKT]

BA_m mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]

LA_m mittlere Anzahl fertiggestellter Aufträge [1/BKT]

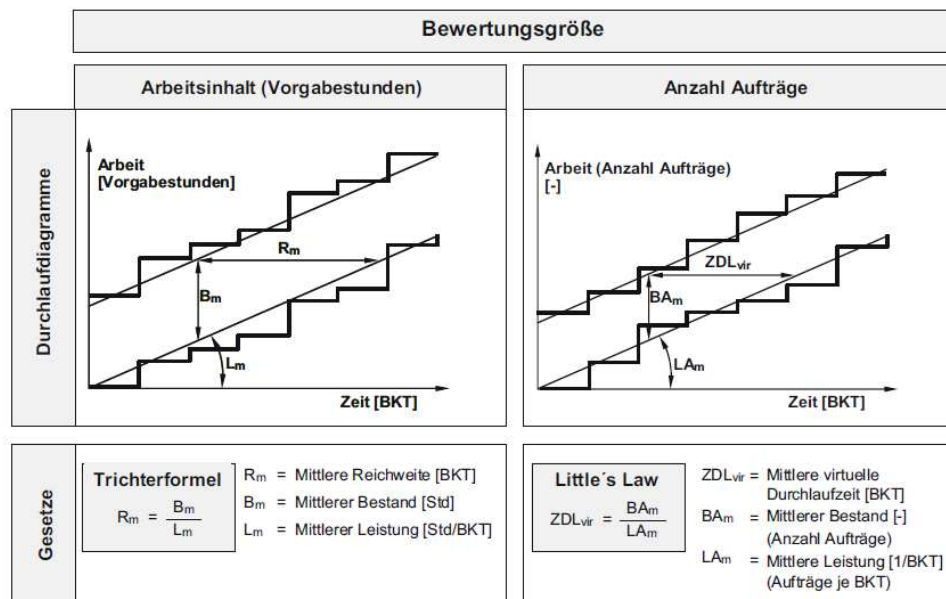
Die Gleichung (2.19) ergibt sich unmittelbar aus der Gleichung (2.14), wenn vorausgesetzt wird, dass die Ankunftsrate λ der Abfertigungsrate LA_m entspricht.⁵⁷

Sowohl bei der Trichterformel als auch bei der aus Little`s Law abgeleiteten Gleichung (2.19) wird der Bestand an einem Arbeitssystem auf die Leistung bezogen, um daraus einen Durchlaufzeitkennwert zu berechnen. Die Unterschiede liegen zunächst in den Dimensionsangaben für die Bezugsgrößen. Während beim Trichtermodell der Bestand in Vorgabestunden gemessen wird, wird bei Little`s Law die Anzahl der Aufträge als Basis genommen. Dasselbe gilt auch für die Leistung, wobei die in Stunden pro Betriebskalendertag bzw. in Anzahl der Aufträge pro Betriebskalendertag angegeben wird. Die Dimension der Größen, mittlere Reichweite und mittlere virtuelle Durchlaufzeit ist zwar in beiden Fällen gleich, jedoch werden über ihre Gleichungen unterschiedliche Zusammenhänge beschrieben. Trichterformel besagt, wie lange es durchschnittlich dauert, bis bei gleichbleibender mittlerer Leistung der Bestand am Arbeitssystem vollständig abgearbeitet ist, sofern

⁵⁷Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.34

zwischenzeitlich kein neuer Auftrag zugeht. Little`s Law hingegen zeigt auf, welche Zeit sich ein neu am Arbeitssystem ankommender Auftrag bis zu seiner Abfertigung im Mittel aufhalten muss.⁵⁸

“Ein weiterer wesentlicher Unterschied liegt in der Beeinflussbarkeit der jeweiligen Kenngröße durch das Abfertungsverhalten an dem System und in der Heterogenität der Auftragszeitstrukturen. Little berücksichtigt lediglich die Anzahl Fertigungsaufträge und nicht deren Arbeitsinhalt. Bei Anwendung der KOZ-Reihenfolgeregel (Kürzeste Operationszeit) werden Aufträge mit geringem Arbeitsinhalt bevorzugt abgearbeitet. So befinden sich durchschnittlich weniger Aufträge im System und wirkt die Regel KOZ unterschiedlich auf die Anzahl der an einem Arbeitssystem wartenden Aufträge im Unterschied zur Trichterformel, bei welcher der Bestand in kumulierten Vorgabestunden berücksichtigt wird. Umgekehrt bei der Anwendung der LOZ-Reihenfolgeregel (Längste Operationszeit) werden Aufträge mit großem Arbeitsinhalt bevorzugt abgearbeitet, sodass viele kleine Aufträge warten. Der Bestand BA_m und die virtuelle Durchlaufzeit ZDL_{vir} sind dann größer. Diese Einflußfaktoren wirken sich hingegen auf die Trichterformel nicht aus.”⁵⁹



IFA D4457

Abbildung 12: Gegenüberstellung der Trichterformel und Little`s Law⁶⁰

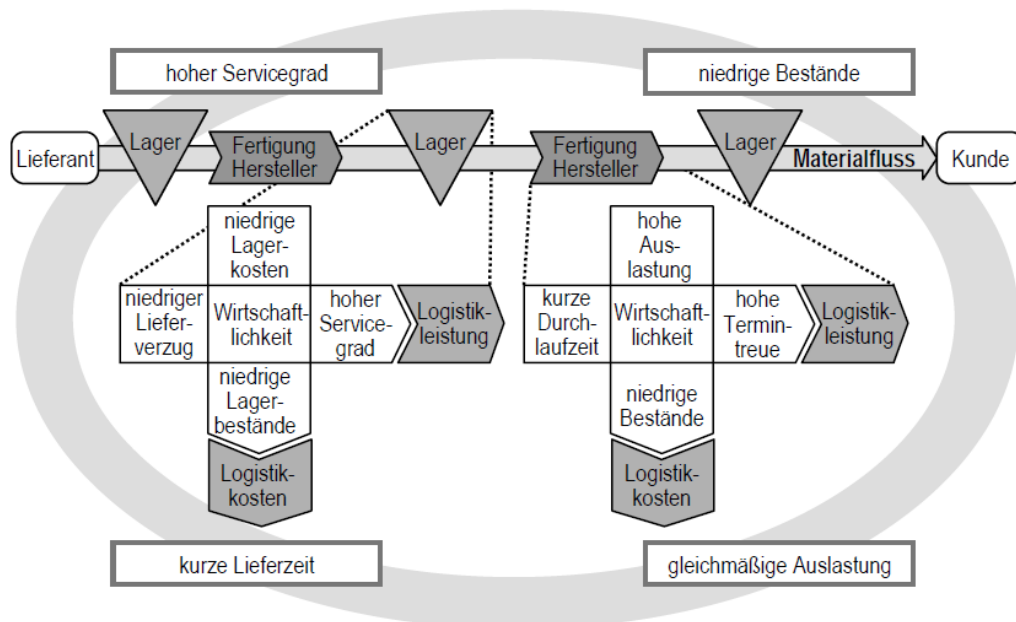
⁵⁸ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.34

⁵⁹ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.35f

⁶⁰ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.35

3 Logistische Zielgrößen und deren Modellierung

Die wirtschaftlich sinnvolle Erfüllung der genannten Kunden- und Unternehmenswünsche setzt eine ganzheitliche Betrachtung der logistischen Zielgrößen voraus.



© IFA 10.160_Fi

Abbildung 13: Zielgrößen in einer logistischen Lieferkette⁶¹

Wiendahl differenziert die Zielgrößen nach ihrem Einfluss auf die *Logistikleistung* und die *Logistikkosten*. Die Logistikleistung einer Lieferkette drückt sich in einer kurzen Lieferzeit und einem hohen Servicegrad gegenüber den Kunden aus. Die Zielgrößen der Lieferkette finden ihre spezifische Ausprägung in den zwei grundsätzlichen Elementen: Fertigung und Lagerung.

“Für die Fertigung und für die Lagerstufen existieren ebenfalls individuell unterschiedliche Zielsysteme. Beide Zielsysteme haben die Wirtschaftlichkeit als Oberziel und verfolgen in Analogie zum Zielsystem der Lieferkette die Richtungen Logistikleistung und Logistikkosten, jedoch mit unterschiedlichen Zielgrößen. Die logistischen Zielgrößen von Fertigungs- und Lagerprozessen unterliegen gegenseitigen Wechselwirkungen. So wird beispielsweise die Logistikleistung eines Erzeugnislagers einer Lieferkette durch die Planabweichungen im Zugang dieses Lagers wesentlich mitbestimmt. Diese Planabweichungen resultieren aus der logistischen Leistungsfähigkeit der vorhergehenden Fertigung, deren logistische Zielerreichung wiederum durch ihr Eingangslager mitbestimmt wird. Die

⁶¹ Quelle: Wiendahl/Nyhuis/Fischer/Grabe, 2006, S.467

Produktionsplanung und -steuerung (PPS) unterstützt die Realisierung dieser marktseitigen Ziele durch die Positionierung der Fertigung im so genannten Spannungsfeld der produktionslogistischen Ziele.⁶²

Wie oben erwähnt, die vier produktionslogistischen Zielgrößen können in zwei Sichten unterteilt werden; marktseitig werden kurze Durchlaufzeiten und hohe Termintreue gefordert und wahrgenommen, betriebsseitig werden eine hohe und gleichmässige Auslastung der Betriebsmittel sowie niedrige Bestände verfolgt.

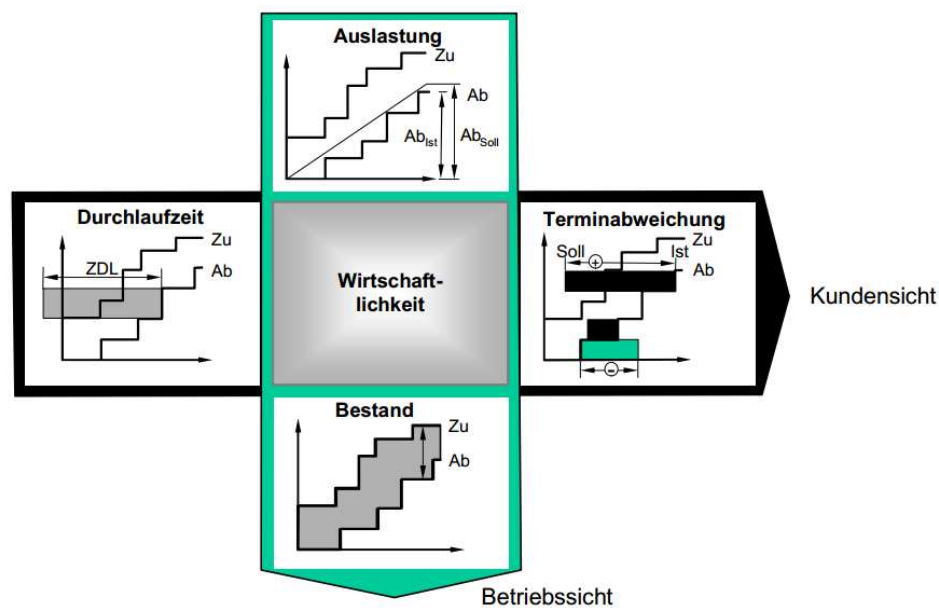


Abbildung 14: Zielkreuz der produktionslogistischen Zielgrößen⁶³

		Referenzprozesse Produktion		
		Produzieren und Prüfen	Transportieren	Lagern und Bereitstellen
Logistische Zielgrößen	Termineinhaltung	hohe Termintreue	hohe Termintreue	niedriger Lieferverzug
	Durchlaufzeit	niedrige Durchlaufzeit	niedrige Transportdurchlaufzeit	niedrige Lagerverweilzeit
	Leistung	hohe Auslastung	hohe Auslastung	
	Bestand	niedriger Umlaufbestand	niedriger Transportbestand	niedriger Lagerbestand
	Kosten	geringe Kosten je Leistungseinheit	geringe Kosten je Transportvorgang	geringe Lagerhaltungskosten

Tabelle 1: Logistische Zielgrößen für die Referenzprozesse der Produktion⁶⁴

⁶² Wiendahl/Nyhuis/Fischer/Grabe, 2006, S.467

⁶³ Quelle: VNL, 2006

⁶⁴ Eigene Darstellung; Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.10

Die Zielgrößen für die Referenzprozesse sind in sich widerspruchsbehaftet. Beim Produzieren gilt es, niedrige Durchlaufzeiten und eine hohe Termintreue zu realisieren, um damit einerseits den Kundenwünschen zu entsprechen, aber andererseits auch die Planungssicherheit zu erhöhen. Zudem wird auch das Änderungsrisiko für angearbeitete Aufträge kleiner. Unternehmensseitig bevorzugt man hingegen eine hohe Auslastung der bereitgestellten Kapazitäten sowie möglichst niedrige Umlaufbeständen erreichen, um so durch die Produktionslogistik beeinflussbare Kosten zu minimieren. Einige dieser Zielteile unterstützen sich, andere hingegen widersprechen sich.

Beim Transport werden geringe Transportkosten angestrebt, indem die Anzahl der eingesetzten Transportmittel so weit wie möglich reduziert und deren Auslastung erhöht wird. Jedoch müssen auch temporäre Transportengpässe vermieden werden, weil diese zu einem Anstieg der Transportdurchlaufzeit und des Transportbestandes führt. Dadurch wird die Termintreue reduziert. Insbesondere bei geringer werdenden Umlaufbeständen in der Fertigung drohen unter Umständen Materialabflußabrisse an den Arbeitssystemen.

Das Ziel im Lager muss es sein, bei gegebenem Lagerzu- und -abgang die Lagerbestände und die damit verbundenen Lagerverweilzeiten so gering wie möglich zu halten, aber trotzdem einen hohen Lieferservice durch einen geringen Lieferverzug sicherzustellen. Somit liegen auch im Lager widerspruchsvolle Zielsetzungen vor.⁶⁵

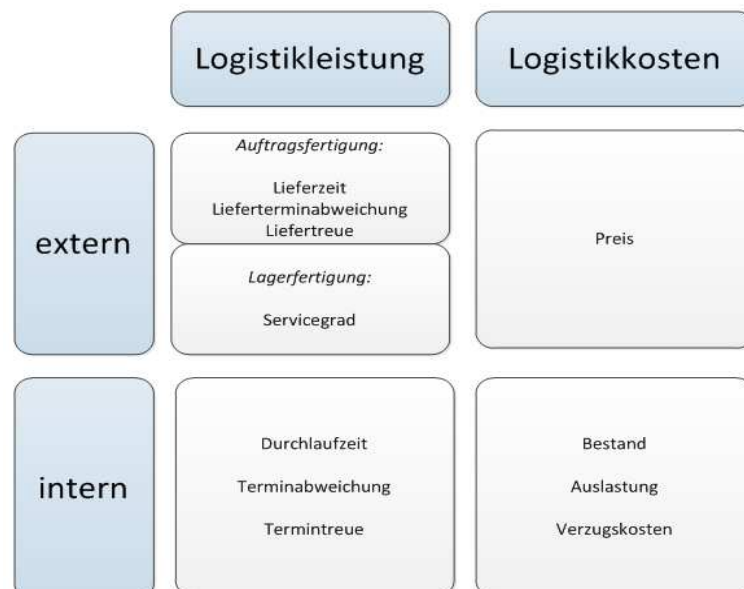


Abbildung 15: Zielgrößen der Logistikleistung und der Logistikkosten⁶⁶

⁶⁵ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.10f

⁶⁶ Eigene Darstellung; Quelle: Lödding, 2008, S.19

“Nach Weber kann als Logistikleistung⁶⁷

- Die Sicherstellung der Verfügbarkeit von Ressourcen,
- Die vollgezogene Raum- und Zeitveränderung (Transport und Lagerung),
- Der vollgezogene Logistikprozess (der Transport- und der Lagerungsvorgang) oder
- Die Bereitstellung der Prozesskapazität

unterschieden werden.”

Nach dem Ansatz von Wiendahl und Luczak versteht man unter Logistikleistung die Erfüllung folgender Ziele: hohe Verfügbarkeit, hohe Produktivität, kurze Durchlaufzeiten und hoher Lieferservice.

Die Logistikleistung beinhaltet die Zielgrößen *Lieferzeit*, *Lieferterminabweichung* und die *Liefertreue*. Aus diesen externen Zielgrößen leiten sich die in der Fertigung messbaren internen Zielgrößen *Durchlaufzeit*, *Terminabweichung* und *Termintreue* ab. Die internen Zielgrößen sind danach differenziert, ob es um eine Auftragsfertigung oder Lagerfertigung geht. *Servicegrad* kann aber als Sonderfall der Liefertreue interpretiert werden, bei dem die Plan-Lieferzeit definitionsgemäß null ist, d. h. sofortige Lieferung.

Bei den Logistikkosten sind die Zielgrößen unabhängig von der Art der Auftragsauslösung. Die internen Logistikkosten werden durch *Bestand*, *Auslastung* und *Verzugskosten* bestimmt.

3.1 Logistikleistung - Externe Logistische Zielgrößen

3.1.1 Lieferzeit

Die Definition der *Lieferzeit* lautet nach Wiendahl: “die Zeitdauer zwischen dem Auftragseingang und der Auslieferung des Auftrags”. Sie wird meist in der Einheit Betriebskalender- oder Arbeitstag gemessen. Die Länge der Lieferzeit hängt wesentlich von der Bevorratungsstrategie wie z. B. Lagerfertigung, Variantenmontage, Auftragsfertigung oder Kundenspezifische Einmalfertigung ab. In der Lagerfertigung ergibt sich die Lieferzeit ausschließlich aus dem Versand der Ware. Zu dieser Versandzeit kommen bei der auftragsbezogenen Produktion auch

⁶⁷ Weber, 1995

die Zeitanteile für Montage und Fertigung hinzu. Wenn eine auftragsbezogene Beschaffung nötig ist, geht auch die Beschaffungszeit in die Lieferzeit ein.⁶⁸

$ZL = ZDL + ZB + ZLP + ZV + BV + ZAD$	(3.1) Lieferzeit
---------------------------------------	------------------

Mit	ZL	Lieferzeit [BKT]
	ZDL	Durchlaufzeit [BKT]
	ZB	Beschaffungszeit [BKT]
	ZLP	Lieferzeitpuffer [BKT]
	ZV	Versandzeit [BKT]
	BV	Belastungsverschiebung [BKT]
	ZAD	Administrationszeit [BKT] ⁶⁹

Die strategische Bedeutung der Lieferzeit ist für den wirtschaftlichen Erfolg nicht beachtet. Empirische Studien zeigen, dass Unternehmen mit kurzen Lieferzeiten schneller wachsen und höhere Gewinne erzielen als die mit langen Lieferzeiten. So wird die Lieferzeit wie der Preis und die Qualität des Produkts bei der Kaufentscheidung berücksichtigt.⁷⁰

3.1.2 Lieferterminabweichung und Liefertreue

Die *Lieferterminabweichung* wird durch die Differenz zwischen dem tatsächlichen und dem geplanten Liefertermin bezeichnet.

$LTA = TL_{IST} - TL_{PLAN}$	(3.2) Lieferterminabweichung
------------------------------	------------------------------

Mit	LTA	Lieferterminabweichung [BKT]
	TL_{IST}	Ist-Liefertermin [BKT]
	TL_{PLAN}	Plan-Liefertermin [BKT] ⁷¹

⁶⁸ Vgl. Lödding, 2008, S.20

⁶⁹ Lödding, 2008, S.40

⁷⁰ Vgl. Lödding, 2008, S.21

⁷¹ Lödding, 2008, S.24

Eine positive Lieferterminabweichung entspricht einer verspäteten Lieferung, eine negative Lieferterminabweichung einer verfrühten Lieferung.

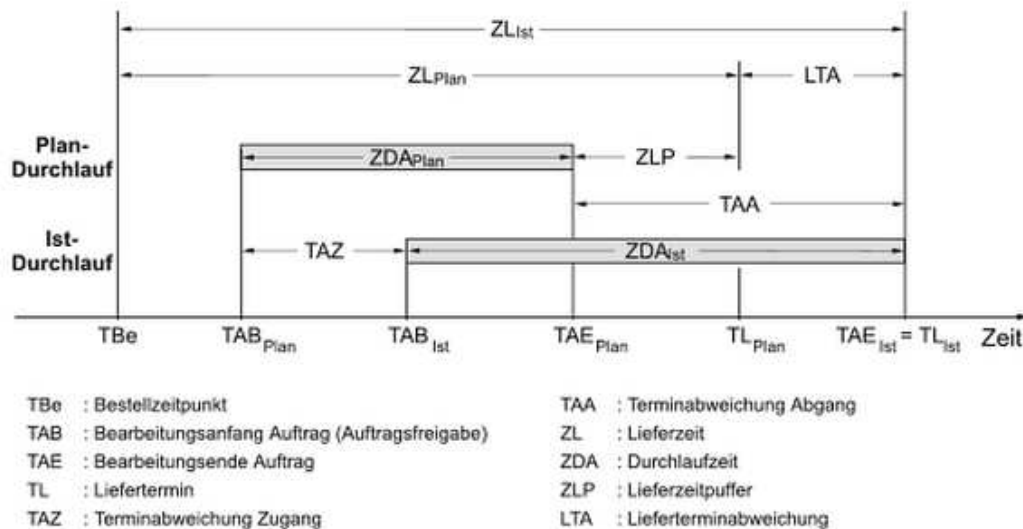


Abbildung 16: Lieferterminabweichung⁷²

Wie aus Abbildung 16 ersichtlich ist, Lieferterminabweichung ergibt sich auch als Differenz von Abgangsterminabweichung und Lieferzeitpuffer eines Auftrags.⁷³

$$LTA = TAA - ZLP$$

(3.3) Lieferterminabweichung

Mit LTA Lieferterminabweichung [BKT]

TAA Abgangsterminabweichung [BKT]

ZLP Lieferzeitpuffer [BKT]

Die Gleichung (3.3) hat die Voraussetzung, dass die Versandzeit vernachlässigt werden kann.⁷⁴

Viele Unternehmen halten zu früh fertiggestellte Aufträge zurück und liefern sie erst aus, wenn der vereinbarte Liefertermin erreicht ist. In diesem Fall gilt:

$$LTA = 0 \quad \text{falls } TAA \leq ZLP$$

$$LTA = TAA - ZLP \quad \text{falls } TAA > ZLP$$

⁷² Quelle: Lödding, 2008, S.43

⁷³ Vgl. Lödding, 2008, S.43

⁷⁴ Lödding, 2008, S.44

Die Lieferzeitpuffer verringert also die Lieferterminabweichung im Vergleich zur Abgangsterminabweichung der Fertigung und erhöht entsprechend die Liefertermineinhaltung.⁷⁵

Die Liefertreue zeigt den prozentualen Anteil der innerhalb einer definierten Liefertermintoleranz gelieferten Aufträge.

$LT = \frac{\text{AnzAuf mit } LTA_{UG} \leq LTA \leq LTA_{OG}}{\text{AnzAuf}} \cdot 100$	(3.4) Liefertreue
---	-------------------

Mit	LT	Liefertreue [%]
	LTA_{UG}	Untergrenze für die zulässige Lieferterminabweichung [BKT]
	LTA	Lieferterminabweichung [BKT]
	LTA_{OG}	Obergrenze für die zulässige Lieferterminabweichung [BKT]
	AnzAuf	Anzahl Aufträge [-] ⁷⁶

Die *Liefertreue* wird stets für einen definierten Bezugszeitraum gemessen. Dabei können die Beträge der Unter- und Obergrenze für die Terminabweichung voneinander abweichen. Zwei wichtige Sonderfälle der Liefertreue sind die Liefertermineinhaltung und der Lieferbereitschaftsgrad.

Die *Liefertermineinhaltung* ist definiert als prozentualer Anteil pünktlich oder verfrüht ausgelieferter Aufträge eines Bezugszeitraums und zeigt somit den Anteil der Aufträge, über die der Kunde zum geplanten Liefertermin verfügen kann.⁷⁷

$LTE = \frac{\text{AnzAuf mit } LTA \leq 0}{\text{AnzAuf}} \cdot 100$	(3.5) Liefertermineinhaltung
---	------------------------------

Mit	LTE	Liefertermineinhaltung [%]
	AnzAuf	Anzahl Aufträge
	LTA	Lieferterminabweichung [BKT]

⁷⁵ Vgl. Lödding, 2008, S.44

⁷⁶ Lödding, 2008, S.24

⁷⁷ Vgl. Lödding, 2008, S.25

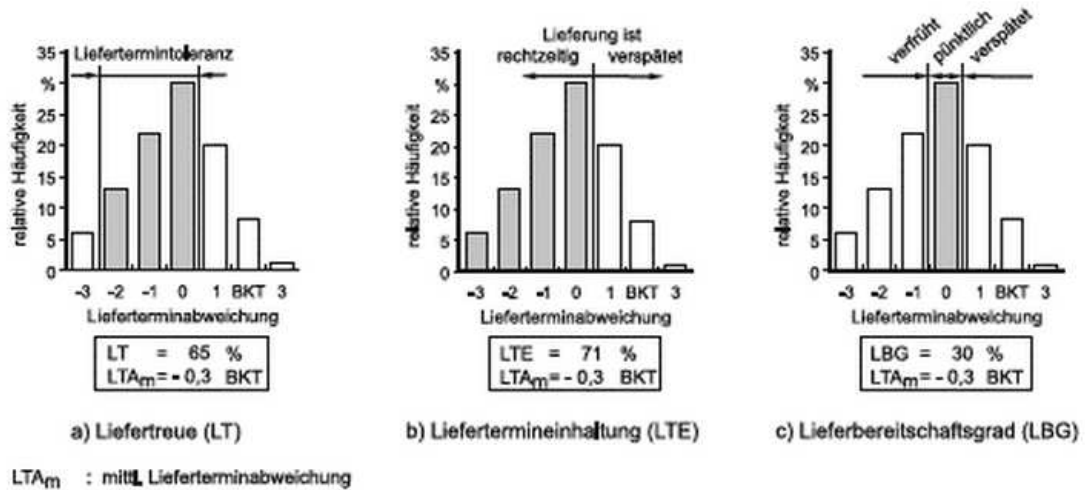
Unter dem *Lieferbereitschaftsgrad* ist der Sonderfall zu verstehen, indem die Aufträge nur zum Plan-Liefertermin ausgeliefert werden dürfen.⁷⁸

$LBG = \frac{\text{AnzAuf mit } LTA = 0}{\text{AnzAuf}} \cdot 100$	(3.6) Lieferbereitschaftsgrad
--	-------------------------------

Mit LBG Lieferbereitschaftsgrad [%]

AnzAuf Anzahl Aufträge [-]

LTA Lieferterminabweichung [BKT]



IFA 10.686m

Abbildung 17: Liefertreue, Liefertermineinhaltung und Lieferbereitschaftsgrad⁷⁹

3.1.3 Servicegrad

Der Servicegrad ist eine der wichtigsten externen Zielgrößen und ist definiert als prozentualer Anteil der sofort bedingten Anfragen an allen Anfragen in einem Bezugszeitraum.⁸⁰

⁷⁸ Vgl. Lötting, 2008, S.25

⁷⁹ Quelle: Lötting, 2008, S.25

⁸⁰ Vgl. Lötting, 2008, S.27

$SG = \frac{AnzNF_{sofort}}{AnzNF} \cdot 100$	(3.7) Servicegrad
---	-------------------

- Mit SG Servicegrad [%]
- AnzNF_sofort Anzahl sofort befriedigter Nachfragen [-]
- AnzNF Anzahl Nachfragen [-]

“Bei Nichtverfügbarkeit des Produktes besteht die Gefahr, dass sich der Servicegrad des Unternehmens verringert, was unmittelbar mit Umsatzverlusten verbunden ist. Daher wirkt der Servicegrad wesentlich direkter auf Umsatzwachstum und Gewinn als etwa die Liefertreue in der Auftragsfertigung.”⁸¹

3.2 Logistikleistung - Interne Logistische Zielgrößen

3.2.1 Durchlaufzeit

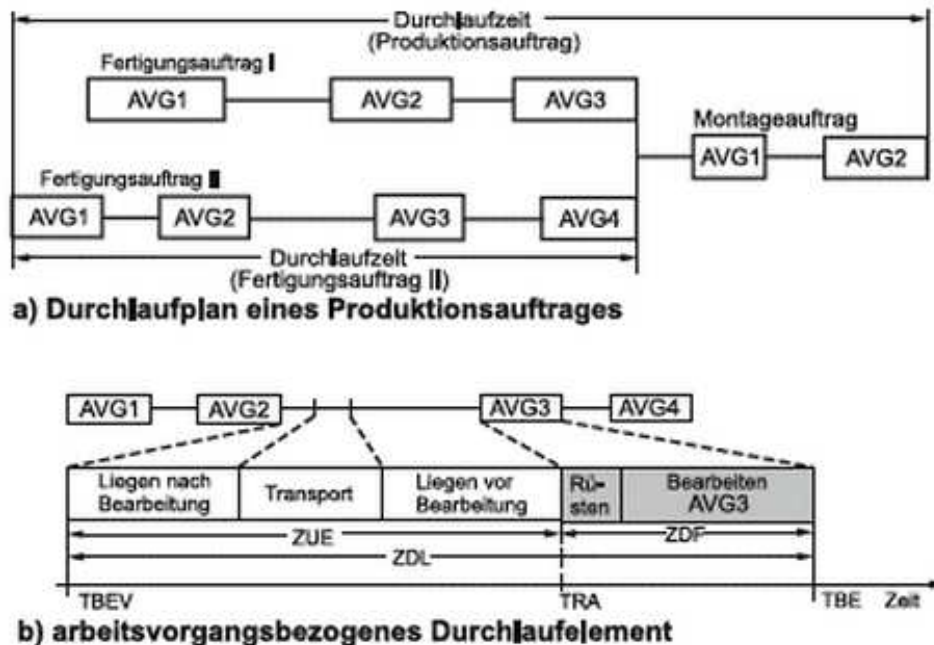


Abbildung 18: Durchlaufzeitanteile und Durchlaufzeitelemente⁸²

⁸¹ Lödding, 2008, S.28

⁸² Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.22

Bei einer losweisen Fertigung wird ein Auftrag nach Beendigung eines Arbeitsvorganges und einer eventuellen Liegezeit am entsprechenden Arbeitssystem zu dem folgenden Arbeitssystem transportiert. Dort trifft das Los in der Regel auf eine Warteschlange und muss solange warten, bis die vor ihm zu fertigenden Aufträge abgearbeitet sind. Sofern die Kapazitäten zur Bearbeitung der Auftrages frei sind, kann das Arbeitssystem umgerüstet werden und die Bearbeitung des Loses kann beginnen. Dieser Zyklus wiederholt sich so lange, bis alle Arbeitsvorgänge des Auftrags durchlaufen sind. Die Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges ist definiert als die Zeitspanne, die ein Auftrag von der Beendigung des vorhergehenden Arbeitsvorganges bis zum Bearbeitungsende des betrachteten Arbeitsvorganges selbst benötigt.⁸³

$ZDL = TBE - TBEV$	(3.8) Durchlaufzeit
--------------------	---------------------

Mit ZDL Durchlaufzeit (Arbeitsvorgang) [BKT]

TBE Termin Bearbeitungsende eines Arbeitsvorganges [BKT]

TBEV Termin Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorganges [BKT]

Das Liegen nach Bearbeitung, die Transportzeit und die Wartezeit werden dem betrachteten Arbeitsvorgang zugeordnet. So werden sie zusammen mit der Durchführungszeit eines Loses zur Übergangszeit und somit zur Durchlaufzeit zusammengefasst.⁸⁴

3.2.2 Terminabweichung und Termintreue

Terminabweichung lässt sich darstellen, indem zu den Rückmeldedaten auch die dazugehörigen Soll-Daten erfasst werden. Dabei wird die Differenz zwischen dem Bearbeitungsende_{IST} und dem Bearbeitungsende_{SOLL} dargestellt.⁸⁵

$TAA = TAE_{Ist} - TAE_{Plan}$	(3.9) Abgangsterminabweichung
--------------------------------	-------------------------------

Mit TAA Abgangsterminabweichung [BKT]

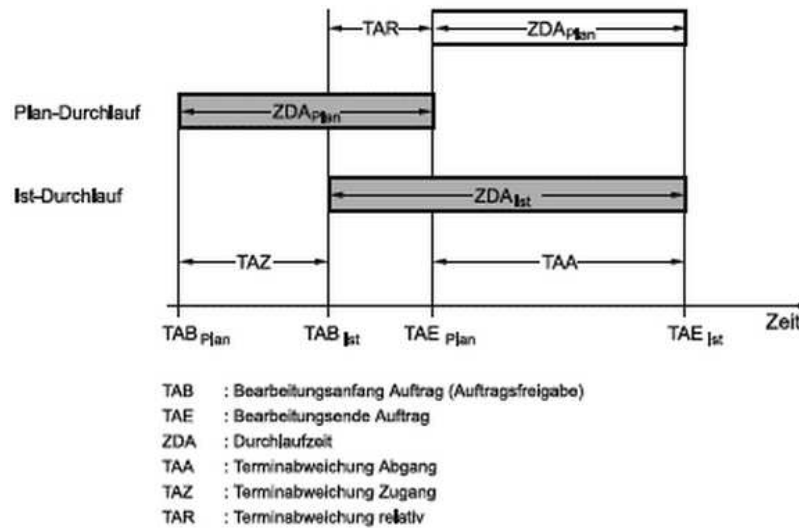
⁸³ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.21

⁸⁴ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.21

⁸⁵ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.23

TAE_{Ist} Ist-Bearbeitungsende Auftrag [BKT]

TAE_{Plan} Plan-Bearbeitungsende Auftrag [BKT]



IFA D4493b

Abbildung 19: Definition der Terminabweichungsgrößen⁸⁶

„Wenn die Differenz positiv ist, bedeutet es eine verspätete Fertigstellung; wenn negativ, eine verfrühte Fertigstellung. Die Abgangsterminabweichung wirkt direkt auf die Lieferterminabweichung und damit auf die Liefertreue.“

Die Zugangsterminabweichung ist ein Maß dafür, um wie viele Tage ein Auftrag gegenüber dem Plan-Starttermin verspätet bzw. vorzeitig freigegeben wird.⁸⁷

$TAZ = TAB_{Ist} - TAB_{Plan}$	(3.10) Zugangsterminabweichung
--------------------------------	--------------------------------

Mit TAZ Zugangsterminabweichung [BKT]

TAB_{Ist} Ist-Bearbeitungsanfang Auftrag [BKT]

TAB_{Plan} Plan-Bearbeitungsanfang Auftrag [BKT]

„Die relative Terminabweichung beschreibt, um welche Zeitdauer der Durchlauf eines Auftrags durch die Fertigung gegenüber der Plan-Durchlaufzeit verzögert ($TAR > 0$) bzw. beschleunigt ($TAR < 0$) wird.“⁸⁸

⁸⁶ Quelle: Lödding, 2008, S.30

⁸⁷ Lödding, 2008, S.30

$TAR = ZDA_{Ist} - ZDA_{Plan} = TAA - TAZ$	(3.11) Relative Terminabweichung
--	-------------------------------------

Mit TAR Relative Terminabweichung [BKT]

ZDA_Ist Ist-Durchlaufzeit Auftrag [BKT]

ZDA_Plan Plan-Durchlaufzeit Auftrag [BKT]

TAA Abgangsterminabweichung [BKT]

TAZ Zugangsterminabweichung [BKT]

Die Termintreue ist ein Maß für die Beurteilung der Gesamtheit aller Aufträge eines Zeitraums. Sie wirkt durch einen Lieferzeitpuffer direkt auf die Liefertreue und ist daher eine sehr wichtige Zielgröße. Sie selbst wird vom Mittelwert und von der Streuung der Abgangsterminabweichung beeinflusst.⁸⁹

$TT = \frac{\text{AnzAuf mit } TAA_{UG} \leq TAA \leq TAA_{OG}}{\text{AnzAuf}} \cdot 100$	(3.12) Termintreue
---	--------------------

Mit TT Termintreue [%]

AnzAuf Anzahl Aufträge [-]

TAA_{UG} Untergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]

TAA Abgangsterminabweichung [BKT]

TAA_{OG} Obergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]

3.3 Logistikkosten - Interne Logistische Zielgrößen

3.3.1 Bestand

Es gibt zwei Arten von Beständen. Es kann zwischen *Lager-* und *Fertigungsbestand* unterschieden werden. Der *Lagerbestand* umfasst Rohmaterial, Halbfabrikate und Fertigwaren. Er wird in Mengeneinheiten gemessen oder für die finanzielle

⁸⁸ Lödding, 2008, S.30

⁸⁹ Vgl. Lödding, 2008, S.31

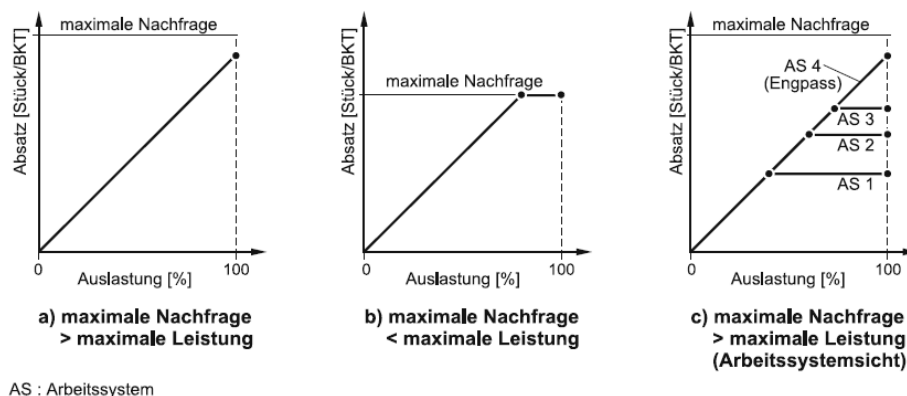
Bewertung in Währungseinheiten bewertet. Der *Fertigungsbestand* wird aus freigegebenen, aber noch nicht fertiggestellten Aufträgen gebildet. Er wird in Vorgabestunden oder als Anzahl der Aufträge gemessen und für bilanzielle Zwecke auch in Mengen- oder Währungseinheiten bewertet.

Der Bestand wirkt durch die Kapitalbindung selbst und durch die aus der Kapitalbindung entstehenden Kosten auf die Finanzen eines Unternehmens. Je höher der Bestand ist, desto mehr Kapital wird im Umlaufvermögen gebunden und desto geringer ist der finanzielle Spielraum des Unternehmens für Investitionen. Der Umlaufbestand einer Fertigung beeinflusst sowohl die Auslastung einer Fertigung als auch die Durchlaufzeit der Aufträge. Die Werte beider Zielgrößen nehmen mit steigendem Bestand zu.⁹⁰

3.3.2 Leistung und Auslastung

Die physikalische Leistung ist definiert als Quotient von Arbeit und Zeit. Die Auslastung beschreibt das Verhältnis von mittlerer und maximal möglicher Leistung eines Arbeitssystems. Die maximal mögliche Leistung bezeichnet dabei die verfügbare Arbeitssystemkapazität.

“In vielen Unternehmen sollen insbesondere sehr teure Maschinen möglichst hoch ausgelastet werden, um so ihre Refinanzierung zu sichern. Nach der Anschaffung sind die Finanzierungskosten jedoch festgelegt und können durch die kurzfristige Entscheidungen der Fertigungssteuerung nicht beeinflusst werden. Sie sind als sunk costs nicht mehr entscheidungsrelevant. Eine Vorgabe an die Fertigungssteuerung, teure Maschinen möglichst hoch auszulasten, ist daher ökonomisch nicht begründet. Sie führt im Gegenteil in vielen Fällen zu erhöhten Beständen und Durchlaufzeiten.”⁹¹



IFA 10.666

Abbildung 20: Einfluss der Auslastung auf den Absatz eines Unternehmens⁹²

⁹⁰ Vgl. Lödding, 2008, S.32f

⁹¹ Lödding, 2008, S.36

⁹² Quelle: Lödding, 2008, S.36

Mit der Auslastung können der Umsatz und damit auch der erwirtschaftete Deckungsbeitrag zunehmen. Wenn es einem Unternehmen gelingt, mit vergleichbaren Maschinen eine höhere Leistung zu erzielen als ein konkurrierendes Unternehmen, dann kann es die Investitionskosten auf mehr Produkte verteilen. Es kann dann entweder einen niedrigeren Preis anbieten oder einen höheren Gewinn erzielen als der Wettbewerber. Dies setzt jedoch voraus, dass die mehr produzierten Güter abgesetzt werden können. (Abbildung 20 a)

Aufgrund der in vielen Branchen vorhandenen Überkapazitäten begrenzt die Nachfrage die Auslastung einer Fertigung. (Abbildung 20 b)⁹³

Selbst wenn ein Unternehmen an der Kapazitätsgrenze arbeitet, ist es meistens nicht möglich, alle Arbeitssysteme vollständig auszulasten. Meist durchlaufen die Aufträge mehrere Arbeitssysteme und belasten diese in unterschiedlichem Maße.

Ist der Durchsatzengpass einer Fertigung vollständig ausgelastet, können keine zusätzlichen Aufträge mehr produziert werden. Wenn keine Aufträge im Dispositionsbestand sind, kann die Leistung der Fertigung nicht mehr gesteigert werden. Die Durchsatzengpässe einer Fertigung bestimmen die Leistung der Fertigung und aller Nichtengpässe. Bei der Abbildung 20 bei c ist das Arbeitssystem 4 Durchsatzengpass der Fertigung. Die Auslastung der übrigen Arbeitssysteme kann nur erhöht werden, indem die Kapazität des Engpasses erhöht wird.⁹⁴

3.3.3 Verzugskosten

“Verzugskosten sind die Kosten, die einem Unternehmen aus der verspäteten Auslieferung eines Auftrags entstehen. Theoretische Arbeiten setzen die Verzugskosten häufig als bekannt voraus.”⁹⁵

⁹³ Vgl. Lödding, 2008, S.36

⁹⁴ Vgl. Lödding, 2008, S.37

⁹⁵ Lödding, 2008, S.37

4 Ableitung der Kennlinientheorie

Die Leistung und die Auslastung an einem Arbeitssystem sind bei hohen Beständen weitgehend bestandsunabhängig. Wenn jedoch ein bestimmter Wert unterschritten wird, so treten Leistungseinbußen aufgrund eines zeitweilig fehlenden Arbeitsvorrates auf. Die Durchlaufzeit steigt hingegen überwiegend proportional mit wachsendem Bestand an. Sie kann ein bestimmtes Minimum nicht unterschreiten, welches sich aus der technisch bedingten Durchführungszeit bei der Auftragsbearbeitung und gegebenenfalls der Transportzeit zwischen zwei Arbeitsvorgängen ergibt.

Kurze Durchlaufzeiten und die daraus resultierende erhöhte Planungssicherheit bewirkt eine hohe Termintreue. Mit steigenden Beständen und Durchlaufzeiten sinkt die Termintreue. Sie verschlechtert sich ebenso, wenn der Bestand so gering ist, dass ungeplante Leistungseinbußen entstehen.⁹⁶

“Insgesamt wird deutlich, dass es nicht möglich ist, gleichzeitig ein Optimum für alle genannten logistischen Zielgrößen zu definieren. Deshalb ist eine logistische Positionierung in dem genannten Spannungsfeld zu empfehlen. Diese geht von einer strategisch bestimmten primären Zielgröße aus und untersucht die Auswirkungen auf die übrigen Ziele.”⁹⁷

Zur Erstellung der Produktionskennlinien sind drei unterschiedliche Modellierungsansätze geeignet. Es handelt sich um:⁹⁸

- die Simulation als experimenteller Modellansatz,
- die Warteschlangentheorie als deduktiver Modellansatz und
- die Kennlinientheorie als deduktiv-experimenteller Modellansatz.

⁹⁶ Vgl. Nyhuis, 2008, S.188

⁹⁷ Nyhuis, 2008, S.189

⁹⁸ Vgl. Nyhuis, 2008, S.189

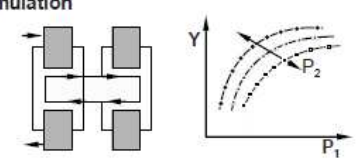
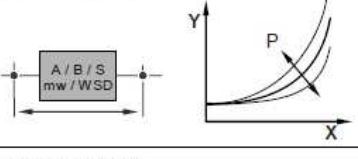
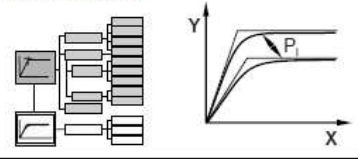
Modellierungsansatz	Vorteile	Nachteile
Simulation 	+ geringer Erstellungsaufwand + Modelladaption möglich + Einzelereignisse beschreibbar + hohe Akzeptanz	- Modellgültigkeit lässt sich nur punktuell nachweisen - Neuaufbau des Modells für jeden Anwendungsfall erforderlich - Übertragbarkeit der Ergebnisse in der Regel nicht möglich - hoher Anwendungsaufwand
Warteschlangentheorie 	+ Modellstruktur und -parameter sind aus elementaren 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 21: Vergleichende Bewertung alternativer Modellierungsansätze zur Erstellung von Produktionskennlinien⁹⁹

Die *Simulation* ermöglicht, reale Systeme mit Hilfe von Rechnerprogrammen nachzubilden und deren Verhalten bei Veränderungen der Simulationsbedingungen zu analysieren und zu beschreiben. Ein wichtiger Vorteil dabei ist der vergleichsweise geringe Modellerstellungsaufwand. Jedoch muss die Simulation in jedem Anwendungsfall neu aufgebaut und auch evaluiert werden. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse ist im Allgemeinen nicht möglich, deswegen ist sie mit einem sehr hohen Anwendungsaufwand verbunden.¹⁰⁰

Warteschlangenmodelle erfordern zwar nur einen geringen Anwendungsaufwand, es sind jedoch Annahmen zu treffen, die bei realen Produktionsprozessen im Allgemeinen nicht gegeben sind. Für die Anpassung eines Modells an spezifische Bedingungen ist die sehr aufwendige Erstellung eines grundsätzlich neuen Modells erforderlich. Schließlich sind die zur Modellanwendung erforderlichen Beschreibungsgrößen vor allem bei komplexen Modellen oftmals nicht praxisgerecht.¹⁰¹

Die *Kennlinientheorie* ist demgegenüber ein alternativer, in der Praxis inzwischen bereits vielfach bewährter Lösungsansatz. Diese Theorie bietet die Möglichkeit, die Abhängigkeiten zwischen den logistischen Zielgrößen des Produktionsprozesses und deren Beeinflussungsmöglichkeiten mit einem vergleichsweise einfachen mathematischen Modell zu beschreiben. Als ein besonderer Vorteil der Kennlinientheorie gilt, dass das zugrunde liegende Modell an veränderte

⁹⁹ Quelle: Nyhuis, 2008, S.190

¹⁰⁰ Vgl. Nyhuis, 2008, S.189

¹⁰¹ Vgl. Nyhuis, 2008, S.190

Bedingungen in weiten Bereichen allein durch seine Parametrisierung adaptiert werden kann. Ein Nachteil der Kennlinientheorie besteht in der Beschränkung auf die Ressourcensicht. Der Durchlauf einzelner Aufträge durch die Produktion lässt sich damit nicht abbilden. Jedoch können elementare Zusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen innerhalb der Anwendungsvoraussetzungen unabhängig von einem speziellen Einzelfall beschrieben werden. Somit lässt sich das grundlegende Verständnis über das statische und dynamische Systemverhalten von Produktionssystemen darstellen. Im Vergleich zu den beiden anderen Modellen hat die Kennlinientheorie ein besonders günstiges Verhältnis von Abbildungsgüte und Anwendungsaufwand.¹⁰²

4.1 Durchlaufdiagramme im Überblick

Wie in Kapitel 2 erwähnt, das Trichtermodell modelliert die Arbeitssysteme einer Fertigung nach einem Vorschlag von Bechte als Trichter, denen Aufträge zugehen und so den Bestand am Arbeitssystem bilden, bis sie nach der Bearbeitung den Trichter bzw. das Arbeitssystem wieder verlassen. Die Ereignisse am Trichter lassen sich in das sogenannte Durchlaufdiagramm übertragen. Das Durchlaufdiagramm entsteht, indem Zugang und Abgang des Trichters gemessen und mit ihrem Arbeitsinhalt in Vorgabestunden kumuliert über der Zeit aufgetragen werden.¹⁰³

Die Art der Darstellung lässt unmittelbar Aussagen über das Abfertigerhalten des Arbeitssystems zu. Sofern die Aufträge in der Reihenfolge ihres Zugangs (FIFO-Prinzip) abgefertigt werden, liegen alle Durchlaufelemente genau zwischen der Zugangs- und der Abgangskurve. Aus Abbildung 22 sind exemplarisch vier unterschiedliche Verläufe von Durchlaufdiagrammen ersichtlich.¹⁰⁴

¹⁰² Vgl. Nyhuis, 2008, S.190f

¹⁰³ Vgl. Lödding, 2008, S.53

¹⁰⁴ Vgl. Nyhuis, 2008, S.193

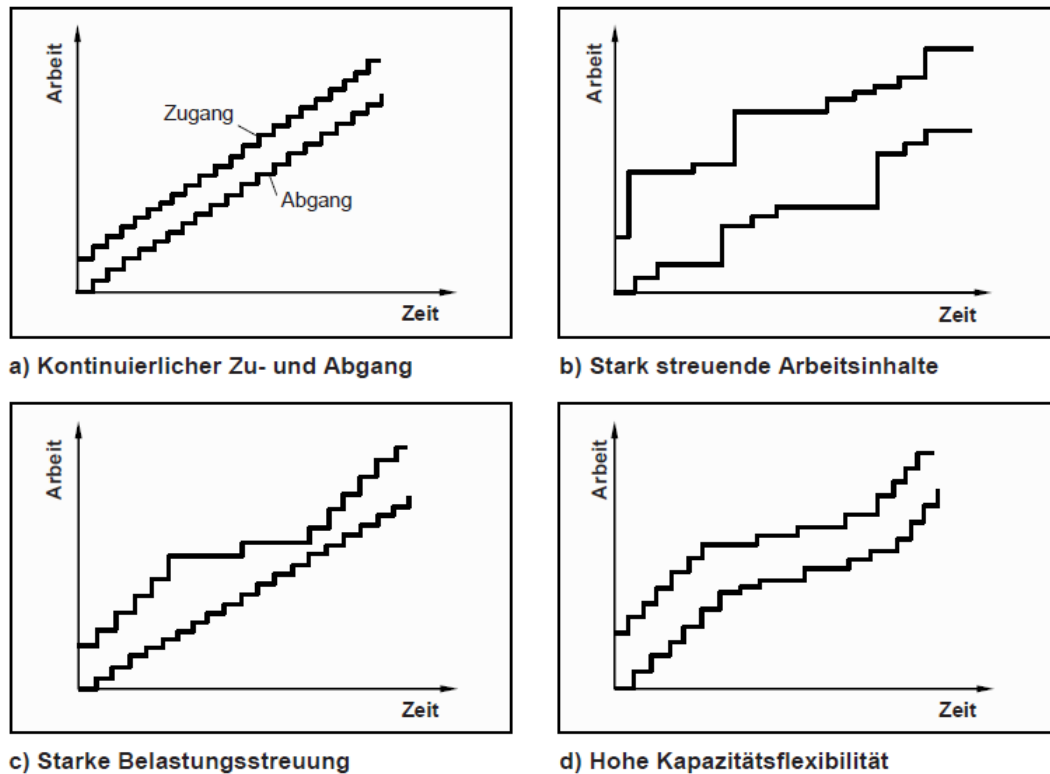


Abbildung 22: Prinzipbeispiele für Durchlaufdiagramme¹⁰⁵

Bei Abbildung 22 a) stehen der Zugang und der Abgang am Arbeitssystem im Gleichgewicht und zeigen einen kontinuierlichen Verlauf. Der Bestand, nämlich der vertikale Abstand von Zugang und Abgang, bleibt annähernd konstant. Die Arbeitsinhalte der Aufträge sind weitgehend gleich.

Bei Abbildung 22 b) hingegen gibt es einen Zustand, indem die Aufträge dem Arbeitssystem mit sehr unterschiedlichen Arbeitsinhalten zugehen und entsprechend abgearbeitet werden. Dadurch kommt es zu starken Schwankungen des Bestandes und einer dementsprechend starken Streuung der Durchlaufzeiten.

Abbildung 22 c) stellt einen Prozesszustand dar, der eine starke Belastungsstreuung, nämlich Schwankungen im Zugang aufweist. Der Abgangsverlauf hingegen verläuft weitgehend konstant. Daraus ist zu verstehen, dass die Kapazität des Arbeitssystems nicht an die Belastungsschwankung angepasst wurde. Als Folge kommt es auch hier zu starken Schwankungen im Bestandsverlauf.

Abbildung 22 d) zeigt eine Schwankung des Zugangs, die in diesem Fall durch eine Anpassung der Kapazität aufgefangen wird. Durch diese Anpassung bleibt das Bestandsniveau annähernd konstant.¹⁰⁶

¹⁰⁵ Quelle: Nyhuis, 2008, S.194

¹⁰⁶ Vgl. Nyhuis, 2008, S.193f

“Das Durchlaufdiagramm beschreibt das dynamische Systemverhalten qualitativ und zeitpunktgenau. Daraus lassen sich grundlegende Informationen über die Produktionsabläufe gewinnen, das Auffinden von Ursachen für Planabweichungen und das Ableiten von Steuerungsmaßnahmen unterstützen.”¹⁰⁷

4.2 Produktionskennlinien

Mit dem Durchlaufdiagramm und den bei Bedarf zu ergänzenden Diagrammen für Durchlaufzeit-, Auftragszeit- und Terminabweichungsverteilung wird das logistische Systemverhalten umfassend dokumentiert. Die Wirkungszusammenhänge zwischen den logistischen Kenngrößen sind damit jedoch nur unvollständig zu klären. Es bleiben die folgenden Fragen offen:

- *“Welche geringsten Durchlaufzeiten können bei den vorliegenden Fertigungs- und Auftragsstrukturen erreicht werden?”*
- *Wie hoch müssen die Fertigungsbestände mindestens sein, um Leistungseinbußen zu vermeiden?”*
- *Mit welchen Maßnahmen lassen sich welche Rationalisierungspotentiale erschließen?”¹⁰⁸*

Eine Unterstützung bei diesen Fragestellungen kann durch die Produktionskennlinien erfolgen.

Die Modelle ermöglichen dabei sowohl die Berechnung als auch die Visualisierung der produktionslogistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand, Leistung (Auslastung) und Terminabweichung (Termintreue). Die Beschreibung der Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Größen erfolgt jedoch nicht oder nur unvollständig, da das Durchlaufdiagramm immer nur einen stationären Zustand des Arbeitssystems wiedergibt. Auch die Trichterformel gibt keine Aussage darüber, wie sich beispielsweise die Leistung in Abhängigkeit zum Bestand entwickelt und welche Auswirkungen sich daraus für die Reichweite bzw. die Durchlaufzeit des Arbeitssystems ergeben.¹⁰⁹

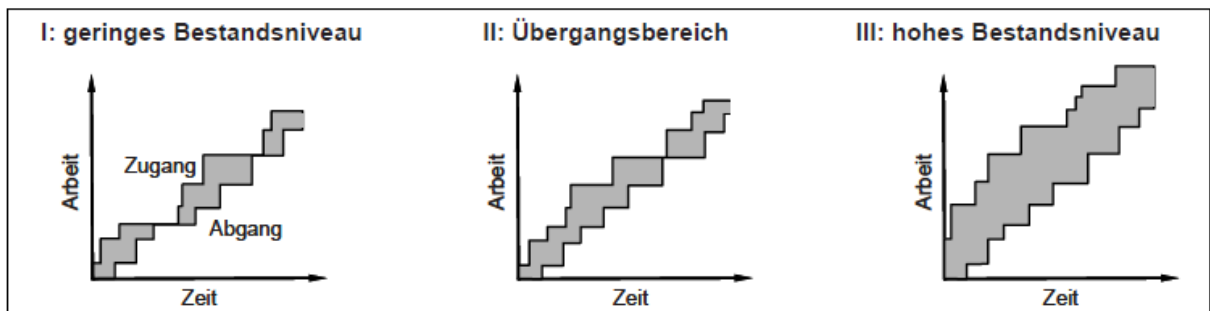
Produktionskennlinien stellen den Verlauf der logistischen Zielgrößen Leistung (bzw. Auslastung), Durchlaufzeit, relative Terminabweichung und Termintreue als Funktion des Bestandes dar. Im Gegensatz zum Durchlaufdiagramm ermöglichen sie so eine unmittelbare Aussage über die Höhe des angemessenen Bestandsniveaus. Die ersten Produktionskennlinien werden von Bechte simulativ ermittelt. Sie wurden damals als Betriebskennlinien publiziert. Nyhuis ist es gelungen, mit Hilfe eines

¹⁰⁷ Nyhuis, 2008, S.194

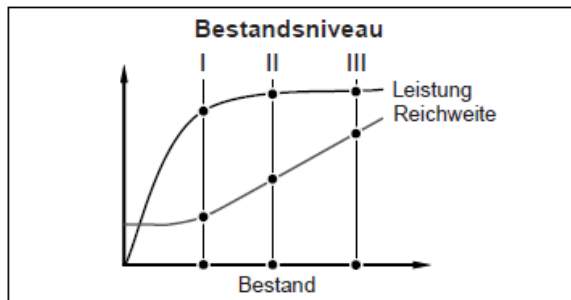
¹⁰⁸ Nyhuis/ Wiendahl, 1999, S.36

¹⁰⁹ Vgl. Burkhalter, 2010, S.29

deduktiv-experimentellen Ansatzes Näherungsgleichungen für die logistischen Zielgrößen Leistung, Auslastung und Reichweite abzuleiten.¹¹⁰ *“Um die Benennung an den Elementarprozessen Produzieren, Prüfen, Transportieren und Lagern auszurichten, wurde durch Nyhuis der Wechsel der Bezeichnung zu Produktionskennlinien vollgezogen.”*¹¹¹ Zusammen mit Ludwig hat er zudem die Kennlinien für die Übergangs- und Durchlaufzeit entwickelt. Yu hat die logistischen Kennlinien für die relative Terminabweichung und für die relative Termintreue ergänzt.¹¹²



a) typische Betriebszustände an einem Arbeitssystem



b) Darstellung der Betriebszustände in Produktionskennlinien

$$B_m(t) = BI_{\min} \cdot (1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4) + BI_{\min} \cdot \alpha_1 \cdot t$$

$$L_m(t) = L_{\max} \cdot (1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4)$$

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

$B_m(t)$	mittlerer Bestand	BI_{\min}	idealer Mindestbestand
$L_m(t)$	mittlere Leistung	L_{\max}	max. mögliche Leistung
$R_m(t)$	mittlere Reichweite	α_1	Streckfaktor
		t	Laufvariable ($0 < t < 1$)

c) Approximationsgleichung zur Berechnung der Kennlinien (Basismodell)

Abbildung 23: Produktionskennlinien¹¹³

Die Herleitung der Produktionskennlinie kann mittels des Durchlaufdiagramms für ein Arbeitssystem erläutert werden. Mit dem Trichtermodell, dem Durchlaufdiagramm und den abgeleiteten Kennzahlen wird jeweils ein bestimmter stationärer Betriebszustand beschrieben. Bei Abbildung 23 im oberen Bild sind drei grundsätzlich unterschiedliche Betriebszustände in vereinfachten Durchlaufdiagrammen. Diese in den verschiedenen Betriebszuständen gemessene

¹¹⁰ Vgl. Lödding, 2008, S.59

¹¹¹ Burkhalter, 2010, S.30

¹¹² Vgl. Lödding, 2008, S.59

¹¹³ Quelle: Nyhuis, 2008, S.197

Leistung, Durchlaufzeit und Bestand werden zu einer Produktionskennlinie stark verdichtet und im unteren Bild dargestellt.¹¹⁴

Ausgehend von den drei Betriebszuständen kann die Produktionskennlinie in entsprechende Bereiche gegliedert werden. Jeder dieser Betriebszustände ist durch ein bestimmtes Bestandsniveau charakterisiert. Der Bereich um den kritischen Bestandswert wird als Übergangsbereich bezeichnet. Bestandswerte links davon gehören zum Bereich Unterlast, höhere Bestandswerte gehören zum Überlast.¹¹⁵

Zustand I entspricht einem Unterlastbereich, wobei sich die Leistung des Arbeitssystems verringert, weil zu wenig Fertigungsaufträge in das System gebracht werden. Es kommt somit zu Arbeitsunterbrechungen. Beim zweiten Zustand, dem Übergangsbereich, ist der Zugang und der Abgang an Fertigungsaufträgen im Gleichgewicht, sodass die Leistungseinbußen sehr gering sind. Mit zunehmendem Bestand konkurrieren die Aufträge um das Arbeitssystem und es bilden sich Pufferbestände. Beim Zustand III, dem Überlastbereich, wird mit dem Ziel der Erreichung einer maximal möglichen Leistung ein extrem hohes Bestandsniveau erzielt.¹¹⁶

Die aus den beschriebenen drei Betriebszuständen resultierenden Leistungszustände und die Reichweite in Abhängigkeit vom Bestand sind beim unteren Bild bei Abbildung 23 dargestellt. Wenn man diese Betriebspunkte um weitere Messpunkte ergänzt und diese verbindet, so erhält man den grundlegenden Verlauf einer Produktionskennlinie. Die Leistungskennlinie verdeutlicht, dass sich die Leistung eines Arbeitssystems oberhalb eines bestimmten Bestandwertes nur noch unwesentlich ändert und asymptotisch der maximal zur Verfügung stehenden Kapazität nähert. Es liegt dann kontinuierlich ausreichend Arbeit vor, sodass keine bestandsbedingten Arbeitsunterbrechungen auftreten. Unterhalb dieses Bestandwertes kommt es jedoch zunehmend zu Leistungseinbußen aufgrund eines zeitweilig fehlenden Arbeitsvorrates.¹¹⁷ Der Grenzwert der maximal möglichen Kapazität wird nur unter bestimmten Bedingungen erreicht, ansonsten ist die maximal mögliche Leistung im Arbeitssystem der Grenzwert, welcher kleiner ist als die maximal mögliche Kapazität. Im Zustand II kann man sehen, dass die Leistungsgrenze erreicht wird. Bei einer Erhöhung des Bestandes wird der Betriebspunkt III erreicht, wobei dies keine Auswirkungen mehr auf die Leistung hat. In einem Extremfall, wenn z. B. im Arbeitssystem keine Fertigungsaufträge mehr vorhanden sind, sinkt die Leistung auf null.¹¹⁸

¹¹⁴ Vgl. Nyhuis/ Wiendahl, 1999, S.36f

¹¹⁵ Vgl. Wiendahl, 1997 in Burkhalter, 2010, S.32

¹¹⁶ Vgl. Kerner, 2002, S.17f

¹¹⁷ Vgl. Nyhuis, 2008, S.197

¹¹⁸ Vgl. Kerner, 2002, S.18

“Ein momentaner Zustand entspricht an einem Arbeitssystem immer nur einem Betriebszustand und damit einem Betriebspunkt auf der Kennlinie. Die Kennlinien selbst stellen dar, wie sich das betrachtete System bei ansonsten unveränderten Randbedingungen verhält, wenn ein anderer Bestand eingestellt wird. Sie charakterisieren somit das logistische Verhalten einer Fertigung bei einer Bestandsveränderung. So besteht die Möglichkeit, Kennlinien für veränderte Fertigungs- oder Auftragsstrukturen zu erstellen, sie miteinander zu vergleichen und so die Wirkungen von Eingriffen in den Produktionsablauf unter logistischen Aspekten zu beurteilen.”¹¹⁹

Die Reichweitenkennlinie veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Bestand und Leistung und wird mathematisch über der Trichterformel bestimmt. Oberhalb des Übergangsbereichs, Zustand II, steigt die Reichweite proportional zum Bestand in Richtung Zustand III an. Unter dem Zustand II strebt sie mit abnehmendem Bestand gegen einen Minimalwert. Dieser Grenzwert für die mittlere Reichweite darf nicht unterschritten werden. Er besteht aus der Durchführungszeit und evtl. prozessbedingten Liegezeiten und Transportzeiten.¹²⁰

Die grundsätzliche Form der Produktionskennlinie gilt für jedes Arbeitssystem. Bestandsreduzierungen führen zu Durchlaufreduzierungen, aber unter Umständen eben auch zu Materialabflussabbrissen und somit zu Auslastungsverlusten. Jedoch sind die spezifischen Ausprägungen der Kennlinien für das jeweils betrachtete Arbeitssystem von unterschiedlichen Rahmenbedingungen wie der Kapazität, den abzuarbeitenden Aufträgen und der Einbindung des Systems in den Materialfluss abhängig.¹²¹

¹¹⁹ Nyhuis, 2008, S.197f

¹²⁰ Vgl. Kerner, 2002, S.18

¹²¹ Vgl. Nyhuis, 2008, S.198

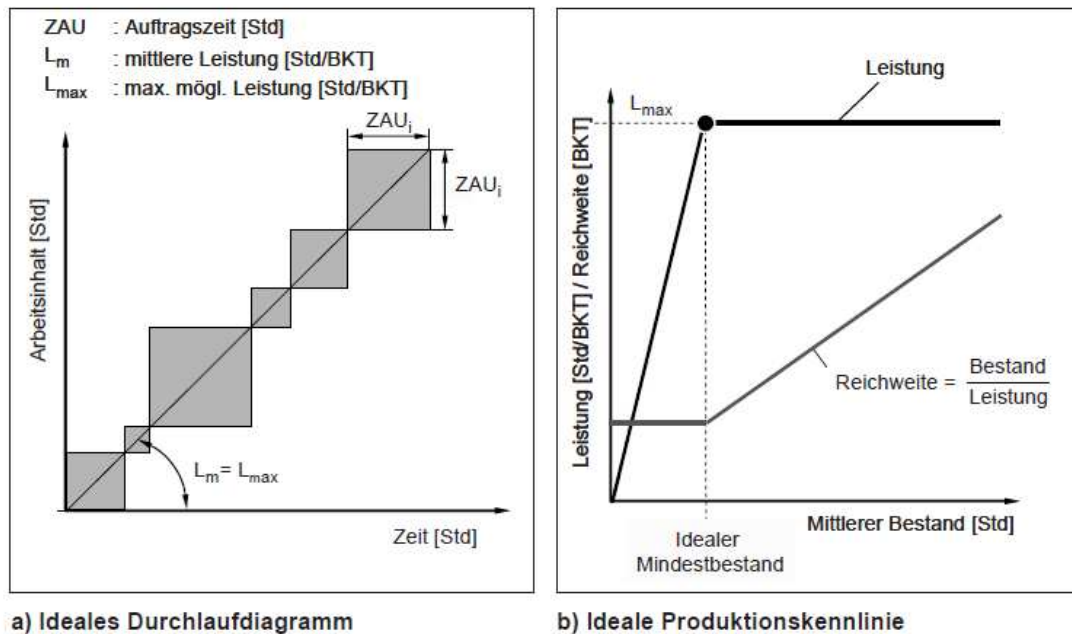


Abbildung 24: Ableitung idealer Produktionskennlinien aus dem idealen Durchlaufdiagramm¹²²

Um die Produktionskennlinien mit wenigem Aufwand erstellen zu können, wurde von Nyhuis am Institut für Fabrikanlagen und Logistik ein mathematischer Ansatz entwickelt, mit dem logistische Kennlinien für Produktionsprozesse über eine Approximationsgleichung mit hoher Abbildungsgenauigkeit berechnet werden können. Ausgangspunkt des mathematischen Modells bildet eine idealisierte Betrachtung der Abläufe im Arbeitssystem.

Ein aus logistischer Sicht idealer Produktionsprozess ist dadurch gekennzeichnet, dass sich an einem Arbeitssystem zu jedem Zeitpunkt genau ein Auftrag befindet.¹²³ Dabei wird ein Arbeitssystem kontinuierlich über einen eigenen Bestandspuffer mit Arbeit versorgt, die vom Arbeitssystem direkt nach der Ankunft abgearbeitet wird. Sobald ein Auftrag das System nach der Bearbeitung verlassen hat, wird das System umgehend mit einem neuen Auftrag versorgt.¹²⁴ Unter diesen Bedingungen entsteht für das Arbeitssystem weder eine Leerzeit, noch Wartezeiten für die Bearbeitung der Aufträge. Unter Annahme eines losweisen Transports und vernachlässigbarer Transportzeiten ergibt sich der Bestand an einem Arbeitssystem unmittelbar aus den Auftragszeiten der zu bearbeitenden Aufträge. Der Mittelwert des so definierten Bestandes wird auch als *idealer Mindestbestand* bezeichnet.¹²⁵

Weil der ideale Mindestbestand im Punkt des Erreichens der Volllastung und damit der maximalen Leistung des Systems liegt, muss als weitere wichtige Größe

¹²² Quelle: Nyhuis, 2008, S.198

¹²³ Vgl. Nyhuis, 2008, S.198f

¹²⁴ Vgl. Reinsch, 2003, S.16

¹²⁵ Vgl. Nyhuis, 2008, S.199

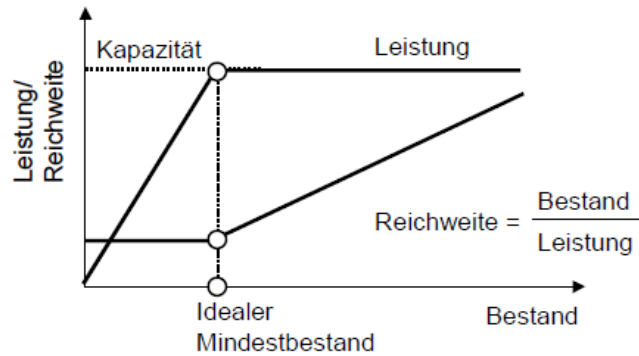
die maximal mögliche Leistung des Systems bestimmt werden. Die maximal mögliche Leistung wird aus dem restriktiven Kapazitätsfaktor abgeleitet. Zur Bestimmung der maximal möglichen Leistung sind von der elementaren Betriebsmittelverfügbarkeit alle die Verfügbarkeit reduzierende Zeiten wie Störungszeiten, Wartung, Urlaub etc. abzuziehen. Die verbleibende maximal mögliche Leistung wird nur noch durch bestandsabhängige Verluste reduziert. Mit den Werten für die maximale Leistung sowie dem idealen Mindestbestand kann nun die ideale Kennlinie erstellt werden.

Wenn der mittlere Bestand des Systems größer ist als der ideale Mindestbestand, so bleibt die Leistung konstant und entspricht der maximalen Leistung des Systems. Sobald der ideale Mindestbestand unterschritten wird, kommt es zu Leistungsverlusten.¹²⁶

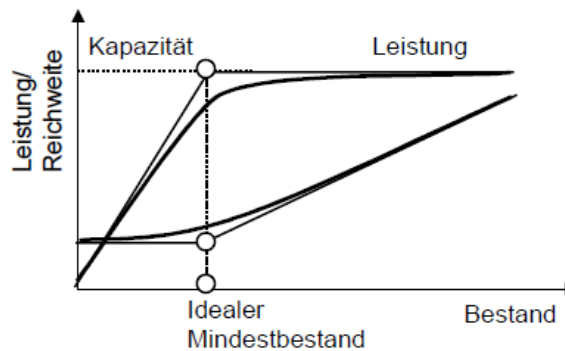
Die ideale Leistungskennlinie ergibt sich aus den folgenden Überlegungen: Wenn sich durch Materialflussabrisse zeitweilig kein Auftrag an dem Arbeitssystem befindet, so ist der mittlere Bestand geringer als der ideale Mindestbestand. Aufgrund der Leerzeiten kommt es zu Leistungseinbußen, die proportional zur Bestandsreduzierung sind. Wenn sich hingegen mehrere Aufträge an dem Arbeitssystem befinden, so erhöht sich zwar der mittlere Bestand, eine Erhöhung der Leistung ist jedoch nicht mehr möglich, da das System bereits an der Grenze der maximal möglichen Leistung betrieben wird. Die ideale Reichweitenkennlinie lässt sich mit Hilfe analoger Überlegungen ableiten und sie ergibt sich gemäß Trichterformel.¹²⁷

¹²⁶ Vgl. Kerner, 2002, S.19

¹²⁷ Vgl. Nyhuis, 2008, S.199



a) Verlauf idealer Produktionskennlinien



b) Verlauf realer Produktionskennlinien

Abbildung 25: Der Verlauf der idealen und realen Leistungs- und Reichweitenkennlinie¹²⁸

Die zuvor getroffenen Annahmen bei der Erstellung einer idealisierten Kennlinie sind in der Praxis schwer zu realisieren. Besonders bei der Werkstattfertigung kommt es zu unregelmäßigen Auftragszugängen und dynamisch entstehenden Engpässen. Diese Bedingungen führen zur Abweichung der in der Praxis gemessenen Betriebspunkte von der idealen Kennlinie. So ist der Abknickpunkt der idealen Leistungs- und Reichweitenkennlinie im idealen Mindestbestand in Wirklichkeit eher ein Abknickbereich. Dies bedeutet, dass in der Praxis ein höherer Bestand am Arbeitssystem vorliegen muss, um Leistungsverluste zu vermeiden.¹²⁹

“Grundlage der Berechnungsgleichung bei Produktionskennlinien ist die Definition eines idealen Produktionsprozesses. Für diesen können ideale Produktionskennlinien abgeleitet werden, die als Basis für die Annäherung der realen Produktionskennlinien mit Hilfe der C-Norm-Funktion dienen.”¹³⁰

¹²⁸ Quelle: Kerner, 2002, S.20

¹²⁹ Vgl. Kerner, 2002, S.20

¹³⁰ Lödding, 2008, S.64f

4.2.1 Ideale Produktionskennlinien

Der ideale Produktionsprozess ist von Wedemeyer dadurch definiert, indem die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:¹³¹

- *“Es befindet sich zu jedem Zeitpunkt genau ein Auftrag an jedem Arbeitssystem.*
- *Ein Auftrag wird unmittelbar nach seinem Zugang bearbeitet. Die Übergangszeiten zwischen zwei Arbeitsvorgängen sind demzufolge null.”*

Wenn diese zwei Bedingungen erfüllt sind, müssen in einem Arbeitssystem die Fertigungsaufträge weder warten, noch müssen sie um die vorhandenen Kapazitäten untereinander konkurrieren. Zur Ableitung der idealen Produktionskennlinie werden nach Nyhuis noch folgende Annahmen getroffen:¹³²

- *“Es wird ein einzelnes Arbeitssystem betrachtet.*
- *Die obere Leistungsgrenze des Arbeitssystems ist durch die maximal mögliche Leistung gegeben.*
- *Die Aufträge und deren Arbeitsinhalte sind gegeben und kurzfristig nicht veränderbar.*
- *Die Fertigungsaufträge werden losweise transportiert, eine überlappte Fertigung ist nicht zugelassen.*
- *Die Transportzeit zwischen zwei Arbeitsvorgängen ist vernachlässigbar gering.*
- *Es liegen hinreichend genaue Planungsdaten zur Ermittlung der Auftragszeiten vor.*
- *Es liegt ein so großer Untersuchungszeitraum vor, dass die Auftragszeitstruktur der abzuarbeitenden Aufträge als repräsentativ für das System angesehen werden kann.”*

4.2.1.1 Der ideale Mindestbestand

Im idealen Produktionsprozess muss weder ein Arbeitssystem auf einen Auftrag warten (Auslastung= 100%) noch ein Auftrag auf die Bearbeitung eines anderen Auftrags warten (Übergangszeit= 0 bzw. Durchlaufzeit= Durchführungszeit).¹³³

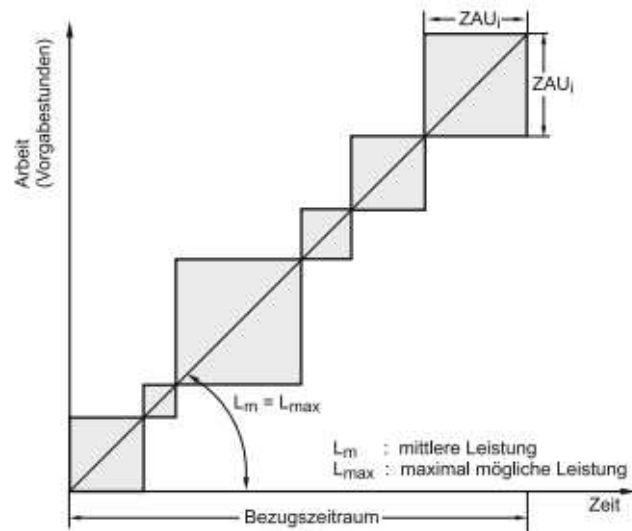
Man kann von der Abbildung 26 bemerken, dass die einzelnen Durchlaufelemente mit ihrer Höhe und Länge ausschließlich durch die Auftragszeiten der Aufträge

¹³¹ Lödding, 2008, S.65

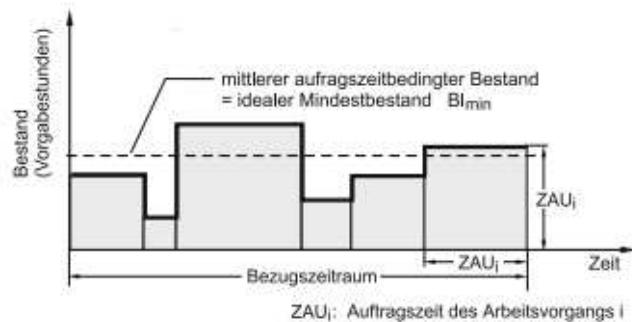
¹³² Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.62

¹³³ Vgl. Lödding, 2008, S.66

bestimmt werden. Bei gleicher Skalierung der x- und y- Achse erkennt man die Durchlaufelemente als Quadrate. Die Zeitachse wird in Vorgabestunden angegeben.¹³⁴



a) Durchlaufdiagramm



b) Bestandsverlauf

IFA D 3644c

Abbildung 26: Darstellung eines idealen Fertigungsprozesses im Durchlaufdiagramm¹³⁵

Der Bestand am Arbeitssystem ergibt sich unmittelbar aus den Auftragszeiten der zu bearbeitenden Aufträge. Der Mittelwert dieses Bestandes wird über die Summe der durch die Auftragszeit entstandenen Flächen dividiert durch die Summe der Einzelwerte der Auftragszeiten berechnet und als BI_{min} bezeichnet.¹³⁶

¹³⁴ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.62

¹³⁵ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.63

¹³⁶ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.63f

$BI_{min} = \frac{(\sum_{i=1}^n ZAU_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i}$	(4.1) Idealer Mindestbestand
--	------------------------------

Mit BI_{min} idealer Mindestbestand [Std]
 ZAU_i Auftragszeit je Arbeitsvorgang [Std]

Bei der Berechnung des idealen Mindestbestandes ist berücksichtigt, dass Fertigungsaufträge mit einem hohen Arbeitsinhalt nicht nur einen hohen Bestand aufweisen, sondern auch eine entsprechend längere Bestandsbindung. Unter Berücksichtigung der Mittelwerte und Standardabweichungen und unter der Verwendung der Formel (2.6) kann nach Umformung folgende Beziehung abgeleitet werden.¹³⁷

$BI_{min} = ZAU_m \cdot (1 + ZAU_v^2)$	(4.2) Idealer Mindestbestand
--	------------------------------

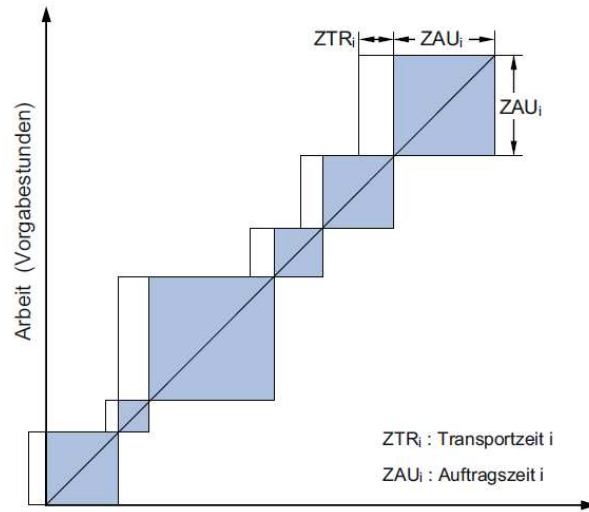
Mit BI_{min} idealer Mindestbestand [Std]
 ZAU_m mittlere Auftragszeit [Std]
 ZAU_v Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

Diese Formel lässt erkennen, dass der ideale Mindestbestand durch das Niveau der Auftragszeit und durch die Streuung der Arbeitsinhalte bestimmt wird. *“Aufgrund der quadratischen Berücksichtigung des Variationskoeffizienten der Auftragszeit beeinflusst die Inhomogenität der Auftragszeitverteilungen maßgeblich den idealen Mindestbestand.”*¹³⁸

Bisher wurde davon ausgegangen, dass die Transportzeit zwischen zwei Arbeitsvorgängen vernachlässigbar gering ist. Sofern diese Bedingung nicht gegeben ist, muss bei der Berechnung des idealen Mindestbestandes auch der durch den Transportvorgang gebundene Bestand berücksichtigt werden.

¹³⁷ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.64

¹³⁸ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.64f



IFA D3644c

Abbildung 27: Der ideale Fertigungsablauf bei Berücksichtigung von Transportvorgängen¹³⁹

Wenn eine Volllauslastung des Arbeitssystems bei geringstmöglichen Beständen realisiert werden soll, so ist es erforderlich, dass der Transportvorgang gerade dann endet, wenn der vorherige Arbeitvorgang abgeschlossen wird. Die zusätzliche Bestandsfläche ergibt sich aus dem Produkt der Transportzeit und der Auftragszeit.

$BI_{min} = \frac{(\sum_{i=1}^n ZAU_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} + \frac{(\sum_{i=1}^n ZTR_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i}$	(4.3) Idealer Mindestbestand
--	------------------------------

Mit BI_{min} Idealer Mindestbestand [Std]

ZAU_i Individuelle Auftragszeit je Arbeitsvorgang [Std]

ZTR_i Individuelle Transportzeit je Arbeitsvorgang [Std]

Wenn die Transportzeit konstant oder vom Auftrag unabhängig ist, so vereinfacht sich die Formel unter der Verwendung der Formel (5.2) :

$BI_{min} = ZAU_m \cdot (1 + ZAU_v^2) + ZTR_m$	(4.4) Idealer Mindestbestand
--	------------------------------

¹³⁹ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.65

Mit	BI_{\min}	idealer Mindestbestand [Std]
	ZAU_m	mittlere Auftragszeit [Std]
	ZAU_v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
	ZTR_m	mittlere Transportzeit je Arbeitsvorgang [Std]

4.2.1.2 Die maximal mögliche Leistung

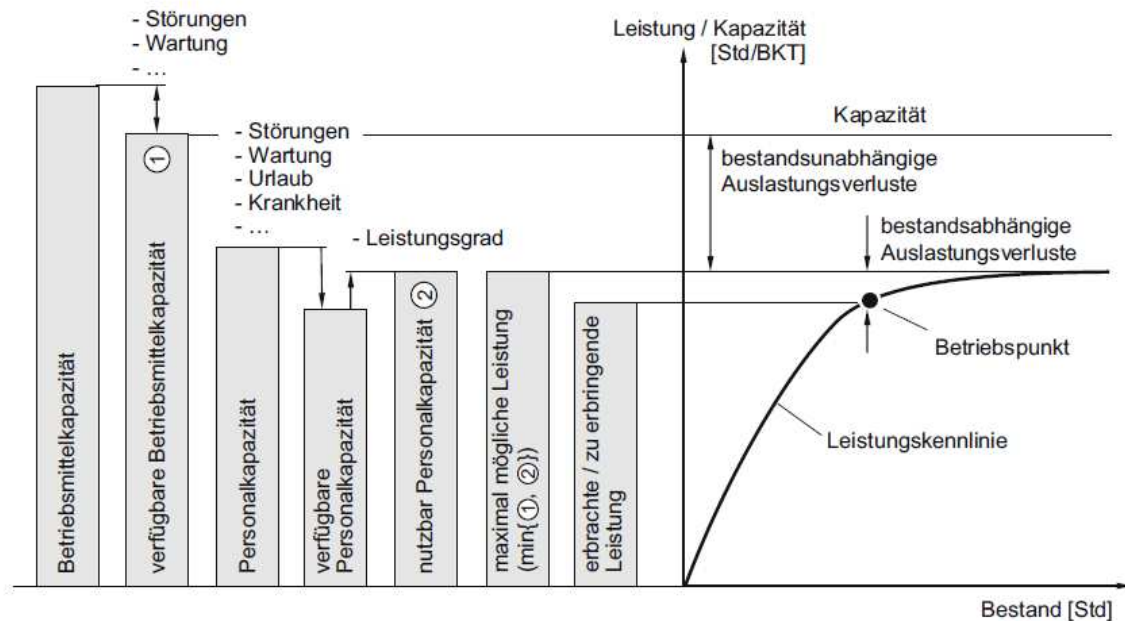
Voraussetzung bei der Ableitung des idealen Mindestbestandes ist, dass die obere Leistungsgrenze des Arbeitssystems durch die maximal mögliche Leistung gegeben ist. Die maximal mögliche Leistung ergibt sich im Wesentlichen aus der Kapazität, sodass die obere Leistungsgrenze durch den restriktiven Kapazitätsfaktor bestimmt wird.

$L_{max} = \min \{ BKAP_v, PKAP_n \}$	(4.5) Maximal mögliche Leistung
---------------------------------------	---------------------------------

Mit	L_{max}	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
	$BKAP_v$	verfügbare Betriebsmittelkapazität [Std/BKT]
	$PKAP_n$	nutzbare Personalkapazität [Std/BKT]

Um die maximal mögliche Leistung zu bestimmen, müssen aus der elementaren Verfügbarkeit die Zeiten abgezogen werden, welche sie durch Störzeiten, Wartung, Urlaub, Krankheit usw. reduzieren. Somit wird die maximal mögliche Leistung im Arbeitssystem nur durch bestandsabhängige Verluste verringert.¹⁴⁰

¹⁴⁰ Vgl. Kerner, 2002, S.19



IFA D0703

Abbildung 28: Abgrenzung der Begriffe Kapazität und maximal mögliche Leistung¹⁴¹

4.2.1.3 Ideale Kennlinien für Leistung und Zeitgrößen

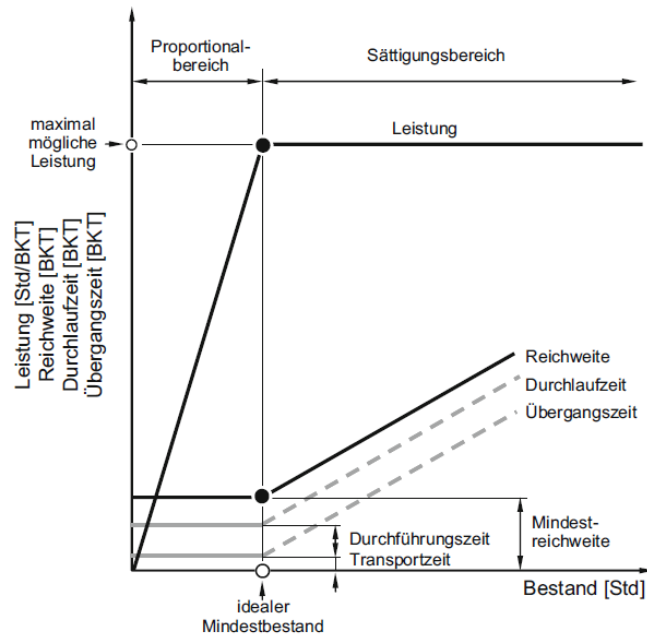
Über die Definition des idealen Mindestbestandes und der maximal möglichen Leistung eines Arbeitssystems lassen sich ideale Kennlinien ableiten. Die maximal mögliche Leistung legt zunächst die obere Leistungsgrenze des Systems fest, die bei Herrschaftung des idealen Mindestbestandes gerade noch erreicht werden kann. Werden nun die Bedingungen teilweise aufgehoben, so lassen sich weitere Betriebszustände ableiten, mit denen das Systemverhalten bei einer Bestandsveränderung prinzipiell beschrieben werden kann.¹⁴²

Wenn sich durch Materialflussabrisse zeitweilig kein Auftrag an dem Arbeitssystem befindet, so ist der mittlere Bestand geringer als der ideale Mindestbestand. Gleichzeitig kommt es aufgrund der Leerzeiten aber auch zu Leistungseinbußen, die proportional zur Bestandsreduzierung sind. Dies entspricht dem Proportionalbereich der idealen Leistungskennlinie. Wenn sich hingegen zeitweilig mehrere Aufträge an dem Arbeitssystem befinden, so erhöht sich zwar der mittlere Bestand, aber eine Erhöhung der Leistung ist jedoch nicht mehr möglich, weil das System bereits an der Grenze der maximal möglichen Leistung betrieben wird. Dies entspricht dem Sättigungsbereich der idealen Leistungskennlinie.

¹⁴¹ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.67

¹⁴² Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.67

Die ideale Reichweitenkennlinie lässt sich gemäß Trichterformel ableiten. Die Reichweite verhält sich im Sättigungsbereich der Leistungskennlinie proportional zu einer Bestandsveränderung. Wird der ideale Mindestbestand jedoch unterschritten, so reduziert sich die Leistung proportional zum Bestand. Die Reichweite bleibt auf der Mindestreichweite konstant.¹⁴³



IFA D2613a

Abbildung 29: Konstruktion idealer Leistungs- und Zeitgrößenkennlinien¹⁴⁴

$R_{min} = \frac{BI_{min}}{L_{max}}$	(4.6) Mindestreichweite
--------------------------------------	-------------------------

- Mit R_{min} Mindestreichweite [BKT]
- BI_{min} idealer Mindestbestand [Std]
- L_{max} maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

Mindestreichweite lässt sich auch nach Umformungen wie folgt beschreiben:¹⁴⁵

¹⁴³ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.67f

¹⁴⁴ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.68

¹⁴⁵ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.69

$R_{min} = ZDF_m \cdot (1 + ZDF_v^2) + \frac{ZTR_m}{L_{max}}$	(4.7) Mindestreichweite
---	-------------------------

Mit	R _{min}	Mindestreichweite [BKT]
	ZDF _m	mittlere Durchführungszeit [BKT]
	ZDF _v	Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]
	ZTR _m	mittlere Transportzeit [Std]
	L _{max}	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

Auch die Durchlaufzeit kann ein bestimmtes Minimum nicht unterschreiten, welches sich aus der Durchführungszeit und gegebenenfalls der Transportzeit ergibt.

$ZDL_{min} = ZDF_m + \frac{ZTR_m}{L_{max}}$	(4.8) Mindestdurchlaufzeit
---	----------------------------

Mit	ZDL _{min}	Mindestdurchlaufzeit [BKT]
	ZDF _m	mittlere Durchführungszeit [BKT]
	ZTR _m	mittlere Transportzeit [Std]
	L _{max}	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

Wobei

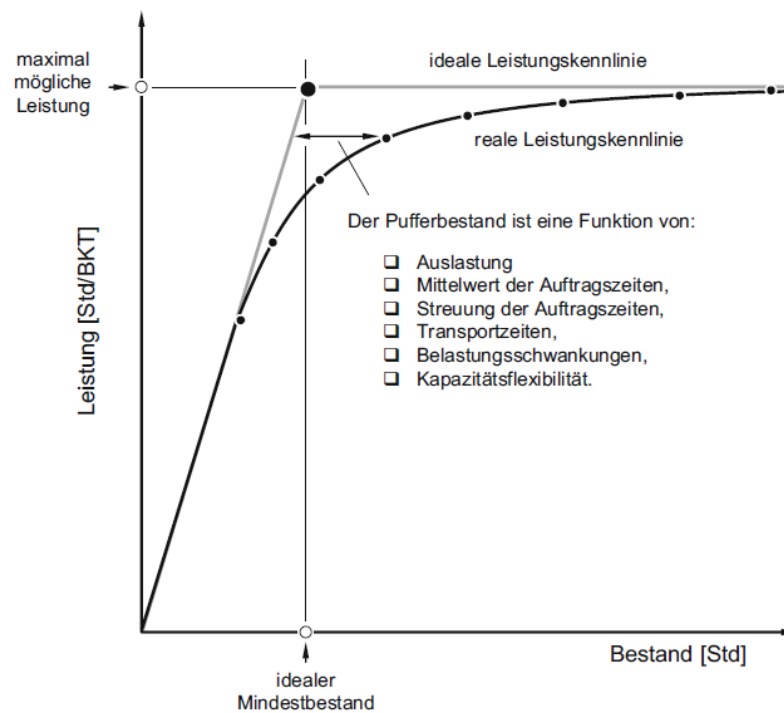
$ZUE_{min} = \frac{ZTR_m}{L_{max}}$	(4.9) Mindestübergangszahl
-------------------------------------	----------------------------

Mit	ZUE _{min}	Mindestübergangszahl [BKT]
	ZTR _m	mittlere Transportzeit [Std]
	L _{max}	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

Die idealen Kennlinien für die Durchlaufzeit und die Übergangszeit sind oberhalb des Mindestbestandes mit gleicher Steigung wie die Reichweitenkennlinie gezeichnet.

4.2.2 Ableitung einer Näherungsgleichung zur Berechnung von Leistungskennlinien

„In der Praxis sind die bei der Ableitung der idealen Kennlinien zugrundegelegten Voraussetzungen nicht gegeben. Insbesondere bei komplexen Fertigungsbereichen mit ungerichteten Materialflussstrukturen gibt es eine Reihe von Einflussfaktoren wie Streuungen im Auftragszugang oder dynamische Engpassituationen, die eine Abweichung der realen Betriebspunkte von den idealen bewirken.“¹⁴⁶



IFA D2613b

Abbildung 30: Gegenüberstellung von idealen und simulierten Leistungskennlinien¹⁴⁷

Wenn man einzelne, mit einem realitätsnahen Simulationsmodell erzeugte Betriebspunkte zu einer simulierten Leistungskennlinie interpoliert, so ist es ersichtlich, dass die Ermittlung realer Leistungskennlinien durch Simulation einen Verlauf ohne einen festen Abknickpunkt zeigt. Der Übergang zwischen dem

¹⁴⁶ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.70

¹⁴⁷ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.70

Proportionalbereich und dem Sättigungsbereich ist daher fließend. In einer realen Fertigung muss immer ein Bestandspuffer vorliegen, um damit Leistungseinbußen zu vermeiden. Der horizontale Abstand zwischen idealer und realer Kennlinie ergibt den Pufferbestand. Dies muss umso größer sein, je größer die mittleren Auftragszeiten und deren Streuungen bzw. Transportzeiten sind, je größer also auch der ideale Mindestbestand ist. Aber auch die vorhandene Kapazitätsflexibilität sowie die Belastungsschwankungen im Auftragszugang haben einen Einfluss auf das erforderliche Bestandsniveau.

Die ideale Leistungskennlinie gibt den Grenzverlauf der realen Leistungskennlinie vor. Die idealen Leistungskennlinien können durch die Integration einer C_{NORM} -Funktion und entsprechender Parametrierung den simulierten Kennlinien angenähert werden.¹⁴⁸

4.2.2.1 Die C_{NORM} -Funktion zur Anpassung der Leistungskennlinien

Der Parameter C_{NORM} beschreibt, wie stark sich die berechnete Kennlinie an den Abknickpunkt der idealen Kennlinie anlehnt. Je kleiner dieser Parameter ist, desto stärker ausgeprägt ist der Knick der berechneten Kennlinie. Wenn $C_{\text{NORM}} = 0$ ist, ist die berechnete Kennlinie gleich der idealen Kennlinie.¹⁴⁹

Für die Berechnung der Leistungskennlinie ist bei Nyhuis/Wiendahl Kapitel 4.2 eine genaue Herleitung der angepassten Näherungsgleichung zu finden. Durch Einsetzen der ermittelten Parameter folgt somit für die Leistungskennlinie:

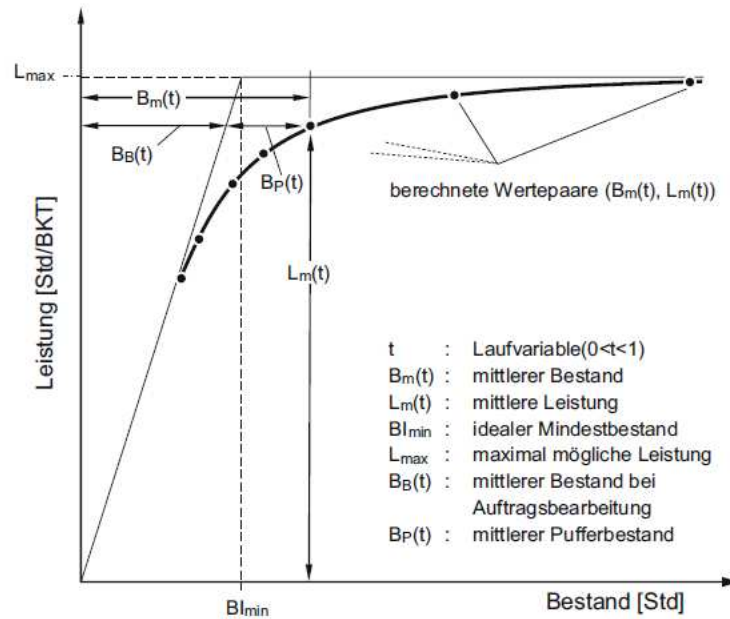
$\left. \begin{aligned} B_m(t) &= BI_{\min} \cdot \left(1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4\right) + BI_{\min} \cdot \alpha_1 \cdot t \\ L_m(t) &= L_{\max} \cdot \left(1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4\right) \end{aligned} \right\}$	(4.10) Mittlerer Bestand & Mittlere Leistung
--	--

Mit	$B_m(t)$	mittlerer Bestand (als Funktion von t) [BKT]
	$L_m(t)$	mittlere Leistung (als Funktion von t) [Std/BKT]
	BI_{\min}	idealer Mindestbestand [Std]
	L_{\max}	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
	$\frac{1}{4}$	C_{NORM} -Wert [-]

¹⁴⁸ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.70f

¹⁴⁹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.70f

Mit dem Gleichungssystem (4.10) kann für jedes t ($0 \leq t \leq 1$) bei gegebenem Bl_{\min} , L_{\max} und α_1 ein Wertepaar für den Bestand und die Leistung berechnet werden. Durch die Berechnung mehrerer Wertepaare erhält man somit eine angenäherte Leistungskennlinie. Das Verhältnis von berechneter Leistung $L_m(t)$ zur maximal möglichen Leistung L_{\max} wird als mittlere bestandsabhängige Auslastung $A_m(t)$ charakterisiert.¹⁵⁰



IFA D1570

Abbildung 31: Bestandteile der Leistungskennlinie¹⁵¹

$A_m(t) = \frac{L_m(t)}{L_{\max}} \cdot 100 = \left(1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4\right) \cdot 100$	(4.11) Mittlere bestandsabhängige Auslastung
---	--

- Mit $A_m(t)$ mittlere bestandsabhängige Auslastung [%]
 $L_m(t)$ mittlere Leistung (als Funktion von t) [Std/BKT]
 L_{\max} maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
 t Laufvariable ($0 \leq t \leq 1$)

Die Bestandgleichung kann in zwei signifikante und unmittelbar interpretierbare Bestandteile $B_B(t)$ und $B_P(t)$ aufgeteilt werden.¹⁵²

¹⁵⁰ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.82

¹⁵¹ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.83

$B_m(t) = B_B(t) + B_P(t)$	(4.12) Mittlerer Bestand
----------------------------	--------------------------

$B_B(t) = BI_{\min} \cdot \left(1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4\right) = \frac{BI_{\min} \cdot A_m(t)}{100}$	(4.13) Mittlerer Bestand bei Auftragsbearbeitung
--	--

$B_P(t) = BI_{\min} \cdot \alpha_1 \cdot t$	(4.14) Mittlerer Pufferbestand
---	--------------------------------

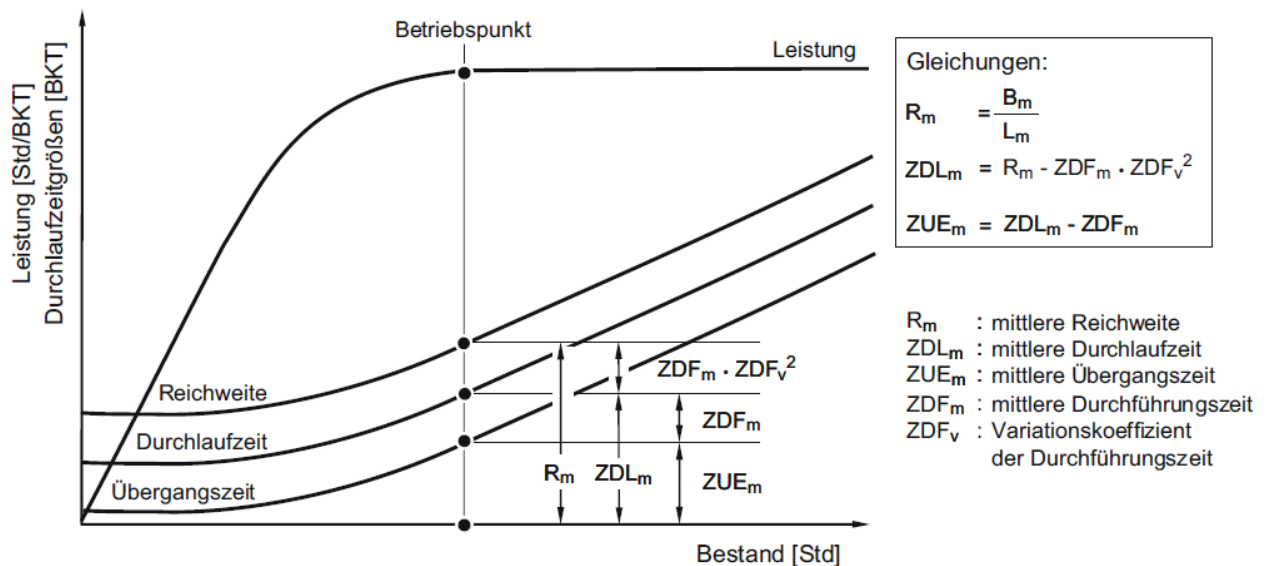
- Mit
- $B_m(t)$ mittlerer Bestand [Std]
 - $B_B(t)$ mittlerer Bestand bei Auftragsbearbeitung [Std]
 - $B_P(t)$ mittlerer Pufferbestand [Std]
 - BI_{\min} idealer Mindestbestand [Std]
 - $A_m(t)$ mittlere bestandsabhängige Auslastung [%]
 - α_1 Streckfaktor [-]
 - t Laufvariable ($0 \leq t \leq 1$)

$B_B(t)$ selbst fällt bei der Auftragsbearbeitung an. Dieser Bestandsanteil kann maximal so groß wie der ideale Mindestbestand werden, wenn sich zu jedem Zeitpunkt ein Auftrag im betrachteten System befindet. Wenn es jedoch aufgrund von Materialflussabbrissen zu Auslastungsverlusten kommt, so reduziert sich dieser Anteil dementsprechend proportional.

$B_P(t)$ charakterisiert den Pufferbestand. Auch dieser Bestandsanteil wird durch idealen Mindestbestand bestimmt. Der zur Sicherung der Auslastung erforderliche Pufferbestand ist von der Auftraggröße und insbesondere von der Streuung der Auftragszeiten abhängig. Die absolute Größe des Pufferbestandes wird durch den empirisch ermittelten Streckfaktor α_1 bestimmt. Der Pufferbestand wächst nicht proportional mit der Auslastung im Arbeitssystem an, sondern wächst überproportional mit steigender Auslastung. Der Grund dafür ist, dass in einem Fertigungsprozess eine hohe Auslastung nur dann möglich ist, wenn dem Arbeitsvorgang ein sehr hoher Bestand vorgehalten wird, um die Streuungen im Auftragszugang kompensieren zu können. Eine hohe Bestandsreduzierung ist nur

dann möglich, wenn in der Fertigung geringe Auslastungsverluste angenommen werden.¹⁵³

Für die Kennlinien der Reichweite, der Durchlaufzeit und der Übergangszeit lassen sich ebenfalls Näherungsgleichungen über die Transformation der C_{NORM} -Funktion ableiten. Das Vorgehen entspricht weitgehend dem der Ableitung der Leistungskennlinie. Die Unterschiede entstammen im Wesentlichen in der Festlegung eines anderen Bezugskordinatensystems. Statt der idealen Leistungskennlinie ist hier erforderlich, die Transformation auf der Basis der idealen Kennlinien für die verschiedenen Durchlaufzeitgrößen zu erstellen. Es besteht noch die Möglichkeit, die Durchlaufzeitkennlinien über berechnete Leistungskennlinien zu ermitteln.¹⁵⁴



IFA D3170

Abbildung 32: Darstellung der mathematischen Zusammenhänge für ausgewählte Kenngrößen¹⁵⁵

$R_m(t) = \frac{B_m(t)}{L_m(t)}$	(4.15) Mittlere Reichweite
----------------------------------	----------------------------

Die Reichweite ergibt sich gemäß der Trichterformel aus dem Bestands-Leistungsverhältnis. Eine entsprechende Beschreibung der Kennlinie der ungewichteten Durchlaufzeit ist nicht unmittelbar möglich. Little's Law lässt sich

¹⁵³ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.82ff

¹⁵⁴ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.84f

¹⁵⁵ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.85

aufgrund der unterschiedlichen Dimensionsangaben für den Bestand nicht anwenden.

Um eine Berechnungsgleichung für die Durchlaufzeitkennlinie ableiten zu können, müssen wir auf die Zusammenhänge und Gleichungen zurückgreifen, die bei der Ableitung der idealen Kennlinien behandelt wurden. Die Kennlinie der mittleren Durchlaufzeit berechnet sich nach der Formel:¹⁵⁶

$ZDL_m(t) = R_m(t) - ZDF_m \cdot ZDF_v^2$	(4.16) Mittlere Durchlaufzeit
---	-------------------------------

Mit $ZDL_m(t)$ Mittlere Durchlaufzeit (als Funktion von t) [BKT]

$R_m(t)$ mittlere Reichweite (als Funktion von t) [BKT]

ZDF_m mittlere Durchführungszeit [BKT]

ZDF_v Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]

Unter der Voraussetzung einer auftragszeitunabhängigen Abfertigungsreihenfolge und ungleicher Arbeitsinhalte der Aufträge ist die mittlere Durchlaufzeit somit immer kleiner als die mittlere Reichweite. Die Größe des Unterschieds wird dabei im wesentlichen über die Streuung der Durchführungszeiten bestimmt.¹⁵⁷

Die Übergangzeitkennlinie setzt sich aus der Übergangszeit und der Durchführungszeit zusammen:

$ZUE_m(t) = ZDL_m(t) - ZDF_m$	(4.17) Mittlere Übergangszeit
-------------------------------	-------------------------------

Mit $ZUE_m(t)$ mittlere Übergangszeit (als Funktion von t) [BKT]

$ZDL_m(t)$ mittlere Durchlaufzeit (als Funktion von t) [BKT]

ZDF_m mittlere Durchführungszeit [BKT]

Die Kennlinien für die Durchlaufzeit und die Übergangszeit konnten nur unter der Voraussetzung auftragszeitunabhängiger Abarbeitungsreihenfolgen abgeleitet werden. Es wurde jedoch nachgewiesen, dass Reihenfolgeregel einen Einfluß auf die Durchlaufzeit haben können. Die Durchlaufzeit ist bei Anwendung der KOZ-Reihenfolgeregel geringer als bei dem FIFO-Prinzip aber bei der LOZ-Regel ist sie größer. Bei großen Warteschlangen ist der Effekt einer Reihenfolgevertauschung

¹⁵⁶ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.86

¹⁵⁷ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.87

wesentlich ausgeprägter als bei geringen Beständen. Ein geringer Bestand erzwingt in immer stärkeren Maße die Abfertigung nach dem FIFO-Prinzip.¹⁵⁸

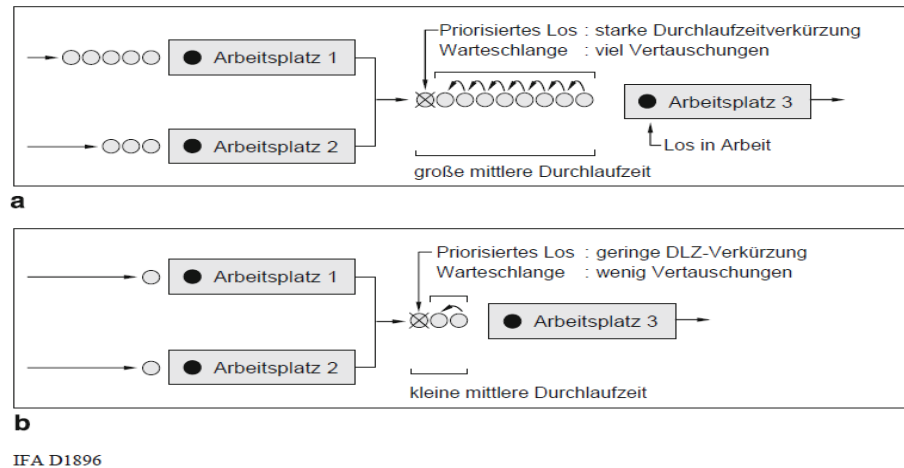


Abbildung 33: Einfluss von Reihenfolgevertauschungen bei unterschiedlichen Warteschlangen¹⁵⁹

Da weder die mittlere Durchführungszeit noch die ggf. zu berücksichtigende mittlere Transportzeit durch eine Reihenfolgeregel beeinflusst werden können, entsprechen die Liegezeiten den veränderlichen Zeitanteilen. Bei geringen Beständen strebt die Liegezeit gegen null. Mit wachsenden Beständen ist jedoch möglich, einzelne Aufträge gezielt vorzuziehen und damit die Liegezeiten zu beeinflussen. Der Effekt ist dabei umso größer, je stärker die Arbeitsinhalte streuen.¹⁶⁰

$ZL_{FIFO}(t) = ZDL_m(t) - ZDF_m - ZTR_m$	(4.18) Mittlere Liegezeit bei Anwendung von FIFO-Regel
---	--

$ZL_{LOZ}(t) \approx ZL_{FIFO}(t) \cdot (1 + ZDF_v^2)$	(4.19) Mittlere Liegezeit bei Anwendung von LOZ-Regel
--	---

$ZL_{KOZ}(t) \approx ZL_{FIFO}(t) \cdot \frac{1}{(1 + ZDF_v^2)}$	(4.20) Mittlere Liegezeit bei Anwendung von KOZ-Regel
--	---

¹⁵⁸ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.87

¹⁵⁹ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.87

¹⁶⁰ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.88

- Mit $ZL_{LOZ}(t)$ mittlere Liegezeit bei Anwendung der LOZ-Reihenfolgeregel [BKT]
 $ZL_{KOZ}(t)$ mittlere Liegezeit bei Anwendung der KOZ-Reihenfolgeregel [BKT]
 $ZL_{FIFO}(t)$ mittlere Liegezeit bei Anwendung der FIFO-Reihenfolgeregel [BKT]
 ZDF_v Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]

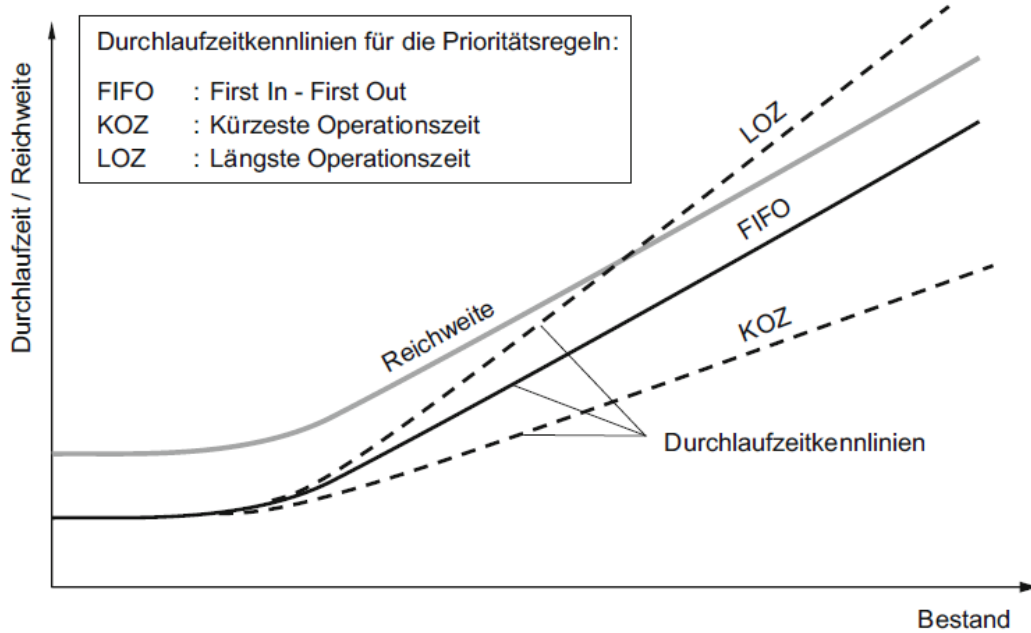
Für die Durchlaufzeiten folgt:

$ZDL_{LOZ} \approx ZL_{FIFO}(t) \cdot (1 + ZDF_v^2) + ZDF_m + ZTR_m$	(4.21) Mittlere Durchlaufzeit bei Anwendung von LOZ-Regel
--	---

$ZDL_{KOZ}(t) \approx ZL_{FIFO}(t) \cdot \frac{1}{(1 + ZDF_v^2)} + ZDF_m + ZTR_m$	(4.22) Mittlere Durchlaufzeit bei Anwendung von KOZ-Regel
---	---

Mit

- $ZDL_{LOZ}(t)$ mittlere Durchlaufzeit bei Anwendung der LOZ-Reihenfolgeregel [BKT]
 $ZDL_{KOZ}(t)$ mittlere Durchlaufzeit bei Anwendung der KOZ-Reihenfolgeregel [BKT]
 $ZL_{FIFO}(t)$ mittlere Liegezeit bei Anwendung der FIFO-Reihenfolgeregel [BKT]
 ZDF_v Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]
 ZDF_m mittlere Durchführungszeit [BKT]
 ZTR_m mittlere Transportzeit [Std]



IFA C2354

Abbildung 34: Kennlinien der Durchlaufzeit bei unterschiedlichen Reihenfolgeregeln¹⁶¹

Es sei nach Nyhuis/Wiendahl angemerkt, dass für die Berechnung von Durchlaufzeitkennlinien ein eingeschwungener Prozesszustand vorliegen muss. Insbesondere gilt, dass die mittlere Reichweite der mittleren gewichteten Durchlaufzeit entsprechen muss, dass also keine tendenziellen Bestandsveränderungen im Untersuchungszeitraum auftreten. Noch muss man darauf hinweisen, dass die Berechnungen nur für Einzelarbeitssystemen gültig sind.¹⁶²

4.2.2.2 Normierte Produktionskennlinien

Bei den Fragestellungen in der Praxis ist es hilfreich, die Bezugsgrößen zu normieren, um damit von systemspezifischen Rahmenbedingungen unabhängige Aussagen treffen zu können. Für die Leistung und den Bestand bietet es sich an, diese Größen auf den idealen Betriebszustand zu beziehen und so als relative Größen auszudrücken.

Der relative Bestand berechnet sich aus dem mittleren Bestand bezogen auf den idealen Mindestbestand:

$B_{rel}(t) = \frac{B_m(t)}{BI_{min}} \cdot 100$	(4.23) Mittlerer relativer Bestand
--	------------------------------------

¹⁶¹ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.89

¹⁶² Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.90

Mit $B_{rel}(t)$ mittlerer relativer Bestand [%]

$B_m(t)$ mittlerer Bestand [Std]

BI_{min} idealer Mindestbestand [Std]

Die normierte Leistungskennlinie ergibt sich, wenn der ideale Mindestbestand und die maximal mögliche Auslastung im Sinne der Normierung zu je 100% gesetzt werden:¹⁶³

$\left. \begin{aligned} B_{rel}(t) &= 100 \cdot \left(1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4 \right) + 100 \cdot \alpha_1 \cdot t \\ A_m(t) &= 100 \cdot \left(1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4 \right) \end{aligned} \right\}$	(4.24) Mittlerer relativer Bestand & mittlere bestandsabhängige Auslastung
---	--

Mit $B_{rel}(t)$ mittlerer relativer Bestand [%]

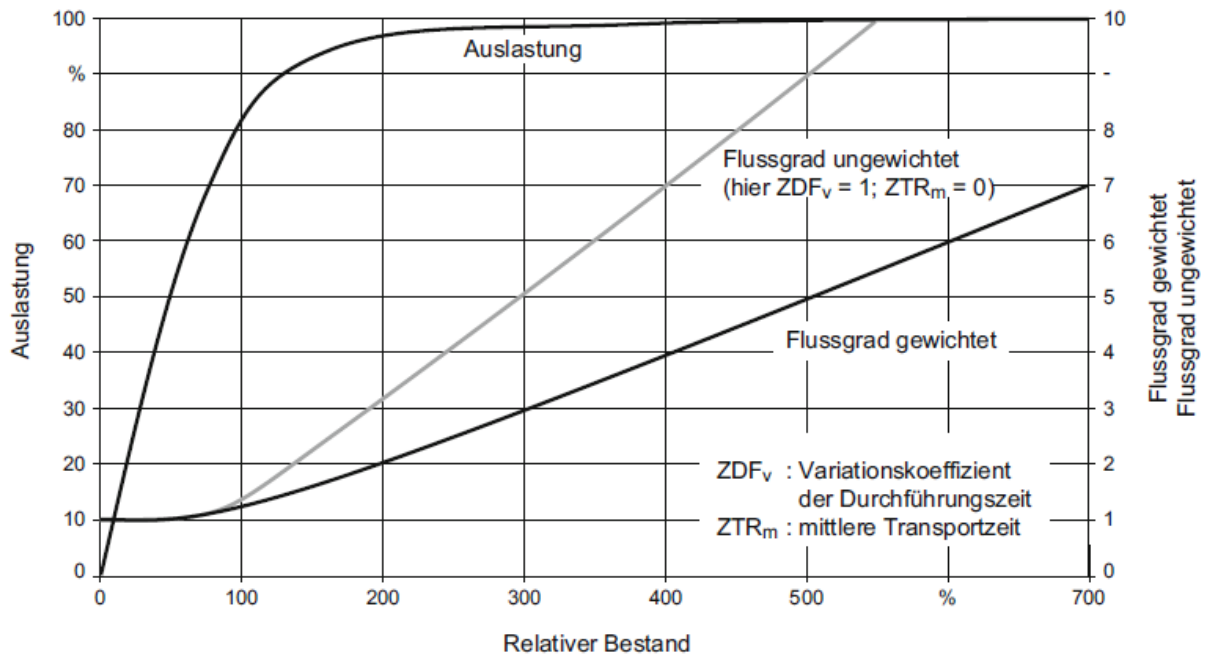
$A_m(t)$ mittlere bestandsabhängige Auslastung [%]

α_1 Streckfaktor [-]

t Laufvariable ($0 \leq t \leq 1$)

Die über diese Gleichung berechnete Auslastungskennlinie ist bei der Abbildung 35 mit dem Streckfaktor $\alpha_1=10$ dargestellt.

¹⁶³ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.90



IFA D3877

Abbildung 35: Normierte Produktionskennlinien¹⁶⁴

Diese Abbildung beschreibt, wie sich unabhängig von den jeweils vorliegenden Auftragszeitstrukturen und der Arbeitssystemkapazität eine Bestandsveränderung die Auslastung des Arbeitssystems beeinflusst. Die bestandsbedingten Auslastungsverluste ergeben in diesem Beispiel ca. 17 %, wenn der mittlere Bestand dem idealen Mindestbestand entspricht. Bei einer Bestandsverdoppelung reduzieren sich die Auslastungsverluste auf ca. 3 %, bei einer Verdreifachung auf ca. 1 %. Dabei wird als relatives Maß für die Durchlaufzeit der Flussgrad verwendet. Man unterscheidet zwischen dem gewichteten und dem ungewichteten Flussgrad. Wenn man den relativen Bestand in Analogie zur Trichterformel zur Auslastung ins Verhältnis setzt, so erhält man als normierte Größe für die Reichweite den gewichteten Flussgrad FG_{mg} .¹⁶⁵

$FG_{mg}(t) = \frac{B_{rel}(t)}{A_m(t)} = \frac{R_m(t)}{R_{min}}$	(4.25) Mittlerer gewichteter Flussgrad
---	--

¹⁶⁴ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.91

¹⁶⁵ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.91

Mit	$FG_{mg}(t)$	mittlerer gewichteter Flussgrad [-]
	$B_{rel}(t)$	mittlerer relativer Bestand [%]
	$A_m(t)$	mittlere bestandsabhängige Auslastung [%]
	$R_m(t)$	mittlere Reichweite [BKT]
	R_{min}	Mindestreichweite [BKT]

Der mittlere ungewichtete Flussgrad FG_m ergibt sich aus dem Verhältnis der mittleren Durchlaufzeit zur Minstdurchlaufzeit:

$FG_m(t) = \frac{ZDL_m(t)}{ZDL_{min}}$	(4.26) Mittlerer ungewichteter Flussgrad
--	--

Mit	$FG_m(t)$	mittlerer ungewichteter Flussgrad [-]
	$ZDL_m(t)$	mittlere Durchlaufzeit [BKT]
	ZDL_{min}	Minstdurchlaufzeit [BKT]

Durch einige Umformungen kommen wir zunächst zum Zusammenhang zwischen gewichteten und ungewichteten Flussgrad:¹⁶⁶

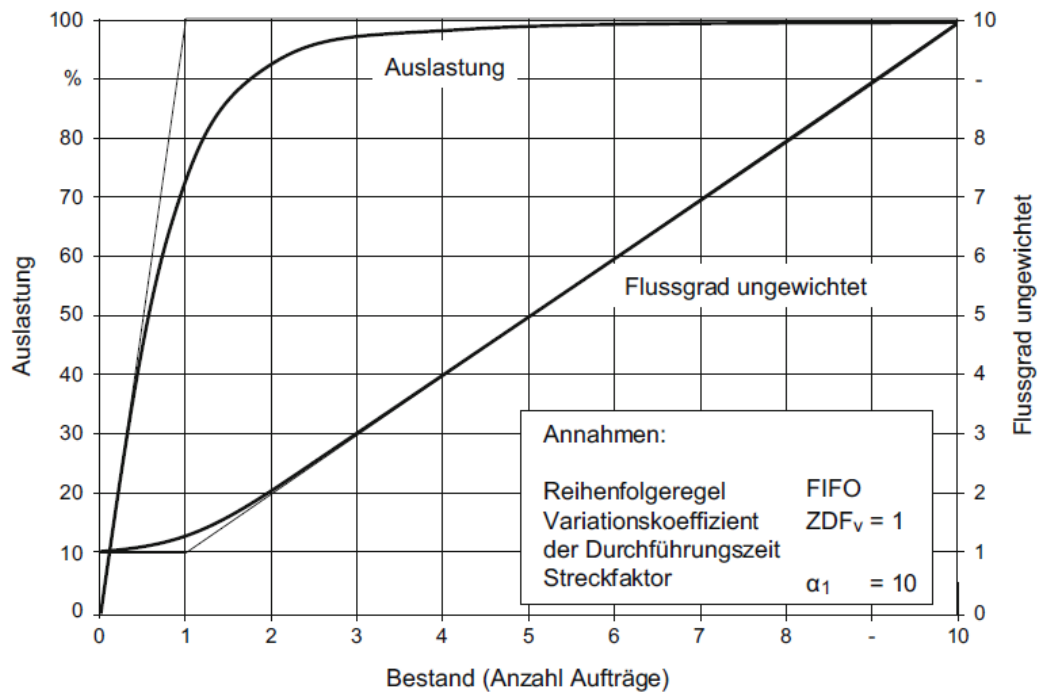
$FG_m(t) = FG_{mg}(t) \cdot (1 + ZDF_v^2) - ZDF_v^2$	(4.27) Mittlerer ungewichteter Flussgrad
--	--

Mit	$FG_m(t)$	mittlerer ungewichteter Flussgrad [-]
	$FG_{mg}(t)$	mittlerer gewichteter Flussgrad [-]
	ZDF_v	Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]

Die Kennlinie für den ungewichteten Flussgrad ist umso steiler, je inhomogener die Arbeitsinhalte der Fertigungsaufträge sind. Mit einem in der Praxis üblichen Variationskoeffizienten von 1 ist ein ungewichteter Flussgrad von >5 erforderlich, damit das Arbeitssystem unter Volllast arbeiten kann.¹⁶⁷

¹⁶⁶ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.92

¹⁶⁷ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.93



IFA D3877b

Abbildung 36: Normierte Produktionskennlinien mit ungewichteten Kenngrößen¹⁶⁸

4.2.2.3 Anwendungsvoraussetzungen für berechnete Produktionskennlinien

Die Erstellung und Nutzung berechneter Produktionskennlinien ist abhängig von Voraussetzungen, die sich aus der Modellstruktur und den Modellparametern ableiten lassen. Es ist zunächst erforderlich, dass sich für den betrachteten Produktionsprozess ideale Kennlinien erstellen lassen. Somit soll sich ein idealisierter Produktionsablauf beschreiben lassen. Alle für die Berechnung des idealen Mindestbestandes und der maximal möglichen Leistung benötigten Parameter müssen mit einer hinreichenden Genauigkeit vorliegen bzw. ermittelbar sein. Ferner ist ein Wert für den Streckfaktor α_1 bestimmen. Mit dem Standardwert $\alpha_1 = 10$ in der Regel wird eine praxisnahe Beschreibung der Wirkungszusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen erreicht. Dies gilt insbesondere dann, wenn auf stärkere mittel- bis langfristige Belastungsschwankungen mit einer Anpassung an Kapazität reagiert wird oder aber auch durch den Einsatz entsprechender Planungs- und Steuerungsverfahren ein Belastungsabgleich durchgeführt wird. Sind solche Anpassungsmöglichkeiten nicht bzw. nur stark eingeschränkt möglich, ist ein größerer α_1 -Wert anzusetzen. Ist

¹⁶⁸ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.96

hingegen eine sehr hohe Kapazitätsflexibilität an dem betrachteten Arbeitssystem gegeben, so kann man dem idealen Produktionsprozess sehr nahe kommen, was sich in der Kennlinientheorie in einem geringen α_1 - Wert kennzeichnet.

Im Rahmen von Ablaufanalysen ist es möglich, die Gültigkeit des zugrundegelegten Streckfaktors zu überprüfen, sofern das zu untersuchende Arbeitssystem im Unterlast- bzw. im Übergangsbereich der Kennlinien betrieben wird. Dazu ist ein erfasster Betriebszustand mit Hilfe einer Durchlaufzeit- und Bestandsanalyse detailliert auszuwerten. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind anschließend mit den Ergebnissen einer Kennlinienanwendung zu vergleichen. Insbesondere ist zu prüfen, ob im erfassten Betriebszustand bestandsbedingte Auslastungsverluste vorlagen und diese in der berechneten Kennlinie bei dem ermittelten mittleren Bestand auch hinreichend genau ausgewiesen wurden. Wenn dies nicht der Fall ist, so ist der Streckfaktor soweit anzupassen, bis eine hinreichende Übereinstimmung feststellbar ist.

Es ist weiterhin noch zu beachten, dass es sich um einen mittelwertbasierten Ansatz handelt, der von einem eingeschwungenen Betriebszustand ausgeht. Der Untersuchungszeitraum muss daher so groß gewählt werden, dass die einzelnen Kenngrößen als repräsentativ für das analysierte Arbeitssystem angenommen werden können. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass insbesondere bei den Auftragszeiten und deren Streuungen keine tendenziellen Veränderungen über der Zeit auftreten, weil diese Größen in der Kennlinientheorie zum idealen Mindestbestand zusammengefasst werden und somit die Steigung der Leistungskennlinie maßgeblich beeinflussen.¹⁶⁹

4.3 Lagerkennlinien

Mit Lagerbestand müssen Schwankungen im Abrufverhalten der Abnehmer abgeschwächt werden wie Lieferterminabweichungen der Zulieferanten. Hier zeigt sich das klassische Dilemma der Materialwirtschaft: Es ist zwischen einer hohen Lieferbereitschaft einerseits und niedrigen Beständen andererseits zu vergleichen.¹⁷⁰

Entsprechend den logistischen Zielsetzungen stehen aus Sicht des Beschaffungs- und Bestandscontrolling die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:¹⁷¹

- *“Welche Lagerbestände sind erforderlich, um eine ausreichende Lieferfähigkeit sicherzustellen?”*

¹⁶⁹ Vgl. Nyhuis, 2008, S.203ff

¹⁷⁰ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S. 223

¹⁷¹ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S. 223f

- *Wie wirken sich Störungen im Lagerzugang und –abgang auf die Lieferfähigkeit aus?*
- *Welches sind geeignete Maßnahmen, um den Lieferbereitschaftsgrad zu erhöhen und wie wirken sich diese Maßnahmen im konkreten Einzelfall aus?’*

Eine Produktionskennlinientheorie ähnliche Methodik ist auch für den Lagerhaltungsprozess abzuleiten, um somit eine effektive Hilfestellung zur Beantwortung der oben genannten Fragen zu erhalten.

Über die Lagerkennlinien können die Wirkungszusammenhänge zwischen dem Lagerbestand und der Lieferbereitschaft in Abhängigkeit verschiedenster Rahmenbedingungen gebildet werden.¹⁷² Im Gegensatz zu Produktionskennlinien, werden Lagerkennlinien nicht aus auftragsinhaltspezifischen Durchlaufdiagrammen, sondern aus artikelspezifischen Lager-Durchlaufdiagrammen abgeleitet.¹⁷³ Mit Hilfe des allgemeinen Lagerhaltungsmodells wird der Lagerbestand, resultierend aus der Differenz von Lagerzugängen und Lagerabgängen, in seinem zeitlichen Verlauf dargestellt. Aus dem Modell lassen sich wichtige beschaffungslogistische Kennzahlen zur Prozessbewertung ableiten, z. B. der mittlere Lagerbestand, die aktuelle Bestandsreichweite und andere Kenngrößen. Es wurde später ein Modell entwickelt, welches auf dem Lager-Durchlaufdiagramm basiert und sich unmittelbar aus dem allgemeinen Lagermodell ableiten lässt. Die Grundidee des Lager-Durchlaufdiagramms besteht darin, die prinzipiell voneinander unabhängigen Teilprozesse des Lagerzugangs und –abgangs auch getrennt voneinander darzustellen. Deswegen werden sämtliche Zugangs- und Abgangsmengen eines Artikels oder einer Artikelgruppe zum jeweiligen Meldezeitpunkt kumuliert über der Zeit aufgetragen. Während die Lagerabgangskurve im Koordinatenursprung beginnt, wird der Startpunkt der Lagerzugangskurve durch den Anfangsbestand im Untersuchungszeitraum bestimmt. Der jeweils aktuelle Lagerbestand lässt sich fortlaufend aus dem senkrechten Abstand zwischen diesen beiden Kurven ermitteln.¹⁷⁴

¹⁷² Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.224

¹⁷³ Vgl. Kerner, 2002, S.25

¹⁷⁴ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.224

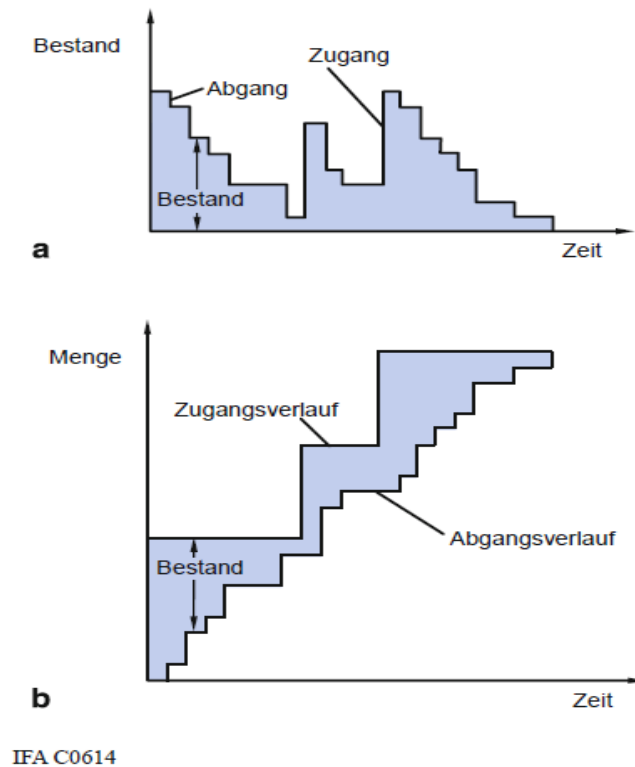


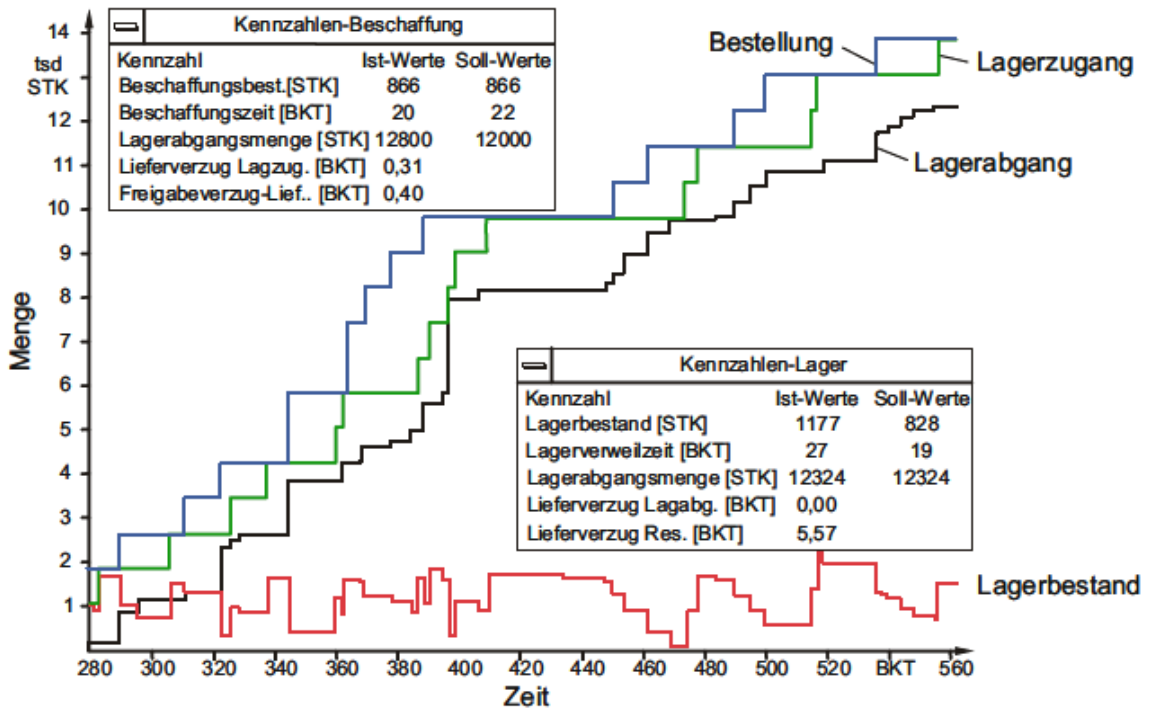
Abbildung 37: Entwicklung des Lager-Durchlaufdiagramms aus dem allgemeinen Lagermodell¹⁷⁵

Die Bestandsgrößen für den Bestell- und Lagerbestand ergeben sich jeweils aus dem senkrechten Abstand zwischen der Bestell- und Lagerzugangskurve bzw. zwischen Lagerzu- und Lagerabgangskurve. Analog dazu werden die Zeitgrößen Beschaffungs- und Lagerverweilzeit durch den waagrechten Abstand zwischen den Kurven ermittelt. Die Steigungen der Bestell-, Lagerzugangs- und Lagerabgangskurven beschreiben den Mengendurchsatz im Betrachtungszeitraum.

Der Lieferverzug ist ein Maß für die Quantifizierung der Zielgröße Termineinhaltung und beschreibt die zeitliche Verzögerung, die durch eine Fehlmengensituation in den nachfragenden Produktionsbereichen entsteht. Zur Ermittlung des Lieferverzuges wird jede auftretende Fehlmenge mit der Fehlzeitdauer multipliziert und die Summe dieser Werte auf die gesamte Bedarfsmenge des betrachteten Artikels in einem Betrachtungszeitraum bezogen. Er ist somit eine mengen- und zeitbezogene Größe und kann im Durchlaufdiagramm dargestellt werden, indem der Nachfrageverlauf der Produktionsbereiche mit der jeweiligen Ist-Kurve verglichen wird.¹⁷⁶

¹⁷⁵ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.225

¹⁷⁶ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.225f

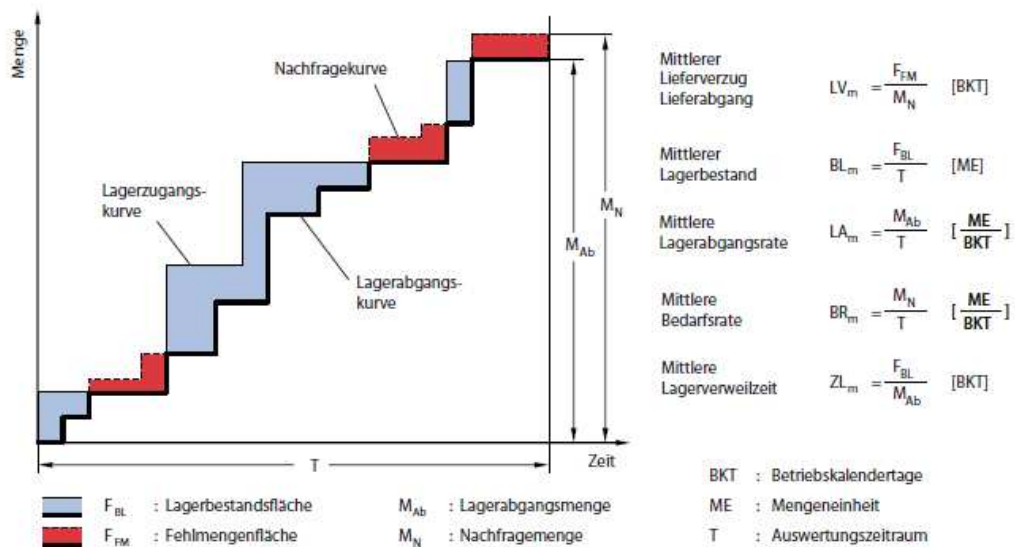


Auswertesubjekt: Anzahl Sachnummer: 1 Auswertez Zeitraum: Anfang BKT: 280 Ende BKT: 559
 Sachnummer: 133136 Periodenlänge: 20

IFA C3304

Abbildung 38: Durchlaufdiagramm eines Beschaffungs- und Lagerhaltungsprozesses¹⁷⁷

Der Einsatz von Lager-Durchlaufdiagrammen und daraus abgeleiteter Kennzahlen ermöglicht es, den Beschaffungs- und Lagerhaltungsprozesses auf der Basis üblicher Betriebsdaten differenziert und detailliert zu bewerten.



IFA D3319

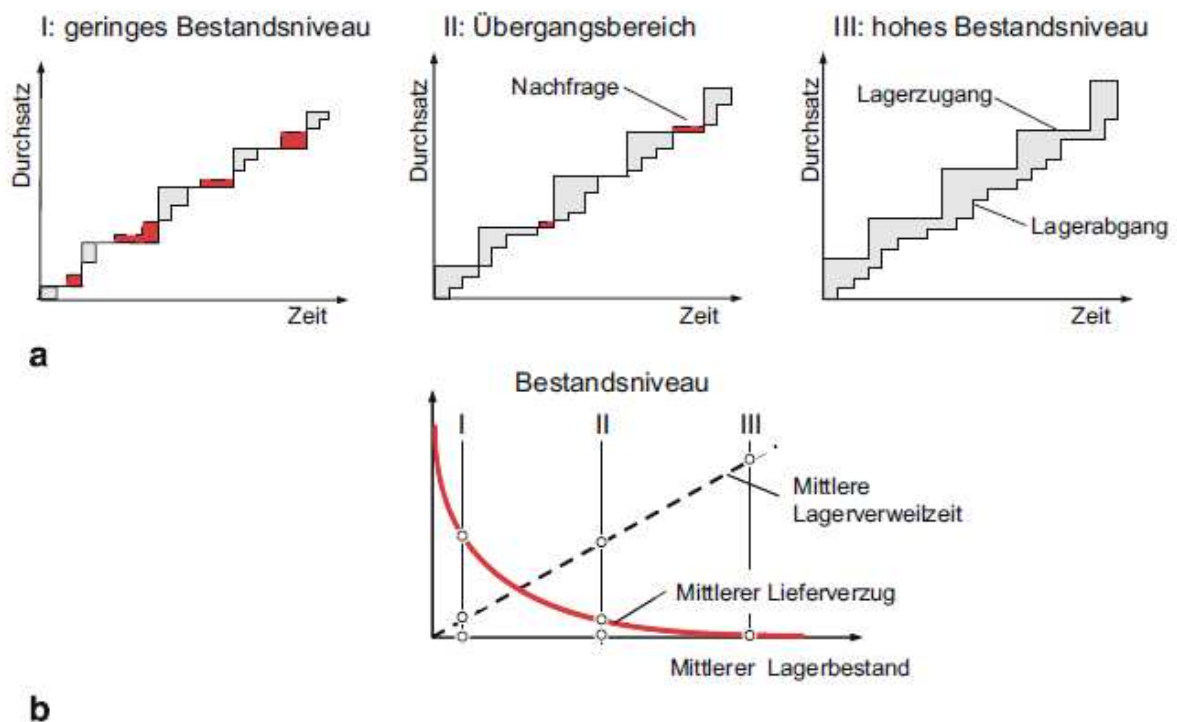
Abbildung 39: Das Lager-Durchlaufdiagramm¹⁷⁸

¹⁷⁷ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.226

Wenn zusätzlich noch der Verlauf der Nachfrage in das Diagramm eingezeichnet wird, kann über die Berechnung der Differenzflächen zwischen Lagerabgangskurve und Nachfragekurve eine Aussage über auftretende Fehlmengen sowie die daraus resultierenden Kenngrößen Liefertreue und Lieferverzug abgeleitet werden.

Um den Zusammenhang zwischen dem Lagerbestand und dem Lieferverzug bei verschiedenen stationären Zuständen beschreiben zu können, ist eine Überführung des Lager-Durchlaufdiagramms in eine Lagerkennlinie hilfreich.¹⁷⁹

Bei Abbildung 40 ist Betriebspunkt III durch ein hohes Lagerniveau charakterisiert. Alle Nachfragen der Produktion können sofort befriedigt werden, es treten keine Lieferverzögerungen im Lagerabgang auf.¹⁸⁰ Wird der Lagerbestand soweit abgesenkt, dass sich Zu- und Abgangskurve gerade berühren, liegt Betriebszustand II mit deutlich niedrigerem Lagerbestand vor, aber es können weiterhin die meisten Nachfragen erfüllt werden und es treten kaum Fehlmengen auf. Wird der Lagerbestand in signifikantem Maß auf fast Nullbestand abgesenkt, treten vermehrt Fehlmengen auf und Nachfragen können nicht erfüllt werden.



IFA C0488b

Abbildung 40: Ableitung der Kennlinie aus dem Lager-Durchlaufdiagramm¹⁸¹

¹⁷⁸ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.226

¹⁷⁹ Vgl. Kerner, 2002, S.25

¹⁸⁰ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.228

¹⁸¹ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.227

Wenn für diese verschiedenen Betriebszustände eines Lagers der resultierende Lieferverzug in Abhängigkeit vom Bestand aufgetragen, durch weitere Messpunkte ergänzt und verknüpft wird, entsteht die charakteristische Form der Lagerkennlinie. Zusätzlich kann noch die mittlere Lagerverweilzeit eingezeichnet werden.¹⁸²

Die Herleitung einer mathematischen Beschreibung der Lagerkennlinie erfolgt analog zur Ableitung der Produktionskennlinie über die Annahme idealisierter Bedingungen. Der Zusammenhang zwischen Lagerbestand, Lieferverzug und Servicegrad wurde zunächst für einen idealisierten Lagerprozess hergeleitet.

4.3.1 Die ideale Lagerkennlinie

Ein idealer Zustand eines Lagerprozesses ist durch folgende Bedingungen charakterisiert:¹⁸³

- *“Der Lagerabgang erfolgt kontinuierlich mit konstanter Lagerabgangsrate. Im Lager-Durchlaufdiagramm kann die Abgangskurve daher als Gerade angenähert werden.*
- *Die Bildung optimaler Bestellmengen ist als ein wesentliches Merkmal der Beschaffung anzusehen. Daher soll der Zugang auch im idealisierten Fall diskret und in endlichen Losgrößen erfolgen.*
- *Es treten keine Prozessstörungen auf.”*

Bei der Voraussetzung idealisierter Randbedingungen wird ein Lagermodell mit kontinuierlichem Lagerabgang, einem diskreten Lagerzugang mit endlichen Losgrößen ohne Prozessstörungen und fehlenden Planabweichungen angenommen.¹⁸⁴ Aus der Abbildung 41 wird ersichtlich, dass sich der mittlere Bestand aus der Summe des Sicherheitsbestandes und der halben Lagerzugangsmenge ergibt. Unter den idealisierten Bedingungen treten Fehlmengen nicht auf, wenn kein Sicherheitsbestand vorliegt. Dies ändert sich jedoch, wenn der Mittelwert des Bestandes weiter reduziert wird, etwa durch einen geringeren Anfangsbestand oder durch einen späteren Zugang des Materials.

Je geringer der mittlere Bestand ist, desto höher ist die Größe der resultierenden Fehlmengen. Für diese ideale Bedingungen hat Gläßner eine Funktion abgeleitet, mit der der Zusammenhang zwischen dem Bestand und dem Lieferverzug im Abgang unter den idealisierten Voraussetzungen dargestellt werden kann.¹⁸⁵

¹⁸² Vgl. Kerner, 2002, S.26

¹⁸³ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.232

¹⁸⁴ Vgl. Kerner, 2002, S.26

¹⁸⁵ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.232f

$LV_m = \frac{1}{BR_m} \cdot \left(\frac{X_{Zu,m}}{2} - \sqrt{2 \cdot BL_m \cdot X_{Zu,m} + BL_m} \right)$	(4.28) Mittlerer Lieferverzug im Lagerabgang
---	--

Mit LV_m mittlerer Lieferverzug im Lagerabgang [BKT]

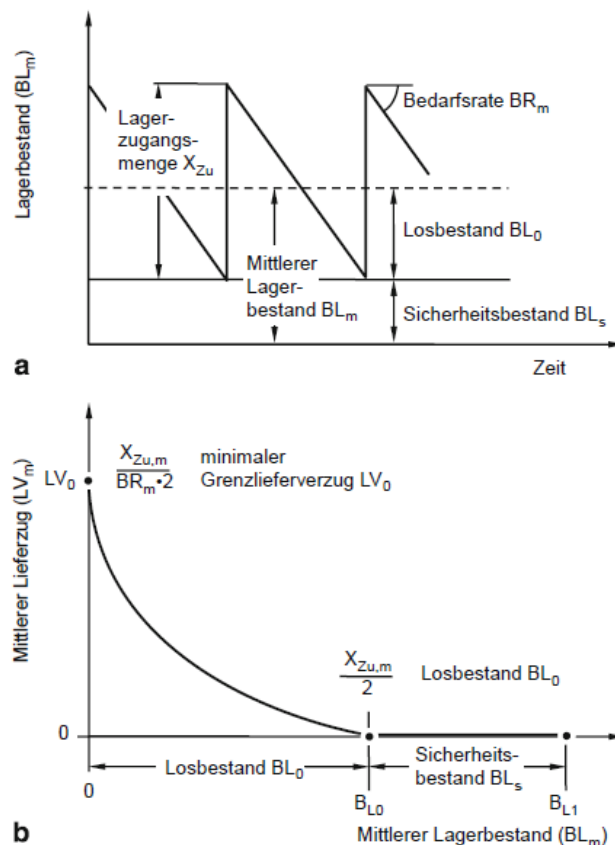
BL_m mittlerer Lagerbestand (in Mengeneinheiten) [ME]

BR_m mittlere Bedarfsrate [ME/BKT]

$X_{Zu,m}$ mittlere Lagerzugangsmenge (Losgröße) je Zugangsereignis [ME]

$0 \leq BL_m \leq X_{Zu,m} / 2$ Definitionsbereich der Funktion

Aus der Abbildung 41 ist ersichtlich, dass der Gesamtlagerbestand aus dem Losbestand und einem eventuell notwendigen Sicherheitsbestand zusammengesetzt ist. Der Sicherheitsbestand dient zum Ausgleich auftretender Störungen im Lagerzu- und Lagerabgang.



IFA D3302

Abbildung 41: Das Lagermodell als Basis der idealen Lagerkennlinie¹⁸⁶

¹⁸⁶ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.233

Unter diesen Bedingungen können zwei Grenzwerte einer idealen Kennlinie berechnet werden. Die Funktion besitzt eine Nullstelle bei BL_0 und einen Maximalwert bei LV_0 .

$BL_0 = \frac{X_{zu,m}}{2}$	(4.29) Losbestand
-----------------------------	-------------------

Mit BL_0 Losbestand [ME]

$X_{zu,m}$ mittlere Lagerzugangsmenge (Losgröße) je Zugangereignis [ME]

$LV_0 = \frac{X_{zu,m}}{2 \cdot BR_m}$	(4.30) Minimaler Grenzlieferrücklauf
--	--------------------------------------

Mit LV_0 minimaler Grenzlieferrücklauf

$X_{zu,m}$ mittlere Lagerzugangsmenge (Losgröße) je Zugangereignis [ME]

BR_m mittlere Bedarfsrate [ME/BKT]

Der Grenzlieferrücklauf LV_0 zeigt sich erwartungsgemäß bei einem Bestandswert von Null. Es bedeutet, dass jede eingehende Lieferung in vollem Umfang sofort in die nachgelagerte Produktionsstufe weitergegeben wird, um die bestehenden Fehlmengen auszugleichen. Eine weitere Verschiebung der Lagerabgangskurve gegenüber der Lagerzugangskurve würde den Lieferverzug noch weiter erhöhen.

Die ideale Kennlinie verlangt, dass keine Planabweichungen auftreten. In der Realität wird der Prozess jedoch durch eine Vielzahl unterschiedlicher Störungen beeinflusst, die die Liefersicherheit des Lagers nachhaltig verschlechtern. In einem weiteren Schritt wurde daher das Modell dahingehend erweitert, dass auch Prozessstreuungen sowie schwankende Lagerabgangs- und -zugangsraten ins Modell einbezogen werden können. Die Basis dieser Funktionsumwandlung ist wiederum die C_{NORM} -Funktion, die bereits bei der Ableitung der Produktionskennlinientheorie verwendet wurde.¹⁸⁷

Bei Terminabweichungen im Lagerzugang muss der Lagerbestand soweit erhöht werden, dass der Bedarf während der Dauer der maximalen positiven Terminabweichung noch befriedigt werden kann. Entsprechendes gilt auch für den

¹⁸⁷ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.234

Fall, dass Mengenabweichungen im Zugang auftreten, weil weniger ins Lager eingelagert wird als geplant.

Auf der Abgangsseite wird die Nachfrage durch die nachfolgenden Prozesse beeinflusst. Da ein Lager nicht beliebig schnell auf eine gesteigerte Nachfrage reagieren kann, müssen entsprechend dimensionierte Sicherheitsbestände vorgehalten werden. Diese stellen die Lieferfähigkeit solange sicher, bis eine Anpassung an die veränderten Rahmenbedingungen erfolgt ist. Für die Abpufferung durch einen Sicherheitsbestand ist daher nur eine mögliche Änderung der Bedarfsrate während der Wiederbeschaffungszeit relevant, da eine Korrektur der Bestellmenge während dieser Zeitspanne in der Regel nicht mehr möglich ist.

Der durch beschaffungsoptimale Losgrößen bedingte Losbestand stellt denjenigen mittleren Bestandwert dar, bei dem unter Voraussetzung der idealen Prozessbedingungen keine Lieferverzögerungen und dementsprechend keine Servicegradverluste erscheinen. Daher muss der mittlere Lagerbestand ausgehend vom Losbestand soweit erhöht werden, dass die Lieferfähigkeit des Lagers auch bei Vorliegen der zuvor erläuterten Planabweichungen auf der Zu- und Abgangsseite sichergestellt ist.¹⁸⁸

Unter Berücksichtigung von Planabweichungen und nach einigen Umformungen ergibt sich die Nullstelle bei einer realen Kennlinie bei dem folgenden Grenzwert für den Lagerbestand:¹⁸⁹

$BL_1 = \frac{X_{Zu,m} - X_{Ab,m}}{2} + \sqrt{(TA_{\max}^+ \cdot BR_m)^2 + (MA_{\max}^-)^2 + ((BR_{\max} - BR_m) \cdot WBZ)^2}$	(4.31) Praktisch minimaler Grenz- bestand
---	--

Mit BL_1 praktisch minimaler Grenzbestand [ME]

$X_{Zu,m}$ mittlere Lagerzugangsmenge (Losgröße) je Zugangseignis [ME]

$X_{Ab,m}$ mittlere Lagerabgangsmenge (Losgröße) je Zugangseignis [ME]

TA_{\max}^+ maximal positive Terminabweichung (Verzögerung) [BKT]

MA_{\max}^- maximal negative Mengenabweichung (Unterlieferung) [ME]

BR_{\max} maximale Bedarfsrate [ME/BKT]

¹⁸⁸ Vgl. Wiendahl/Nyhuis/Fischer/Grabe, 2006, S. 489

¹⁸⁹ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.239f

BR_m mittlere Bedarfsrate [ME/BKT]

WBZ Wiederbeschaffungszeit [BKT]

Bei einem Lagerbestand von Null ergibt sich der Grenzwert des Lieferverzugs der realen Kennlinie:

$LV_1 = \frac{X_{Zu,m} - X_{Ab,m}}{2 \cdot BR_m} + \sqrt{(TA_{\max}^-)^2 + \left(\frac{MA_{\max}^+}{BR_m}\right)^2 + \left(\frac{(BR_m - BR_{\min}) \cdot WBZ}{BR_m}\right)^2}$	<p>(4.32) Praktisch minimaler Grenzlieferverszug</p>
---	--

Mit LV_1 praktisch minimaler Grenzlieferverszug [ME]

$X_{Zu,m}$ mittlere Lagerzugangsmenge (Losgröße) je Zugangereignis [ME]

$X_{Ab,m}$ mittlere Lagerabgangsmenge (Losgröße) je Zugangereignis [ME]

TA_{\max}^+ maximal positive Terminabweichung (Verzögerung) [BKT]

MA_{\max}^- maximal negative Mengenabweichung (Unterlieferung) [ME]

BR_{\max} maximale Bedarfsrate [ME/BKT]

BR_m mittlere Bedarfsrate [ME/BKT]

WBZ Wiederbeschaffungszeit [BKT]

Wenn die Gleichungen (4.31) und (4.32) in die nachfolgenden Näherungsformeln eingesetzt werden, kann eine reale Lagerkennlinie mathematisch beschrieben werden.

$\left. \begin{aligned} BL_m(t) &= BL_1 \cdot t \\ LV_m(t) &= LV_1 \cdot \sqrt[3]{1 - t^3} \end{aligned} \right\}$	<p>(4.33) Mittlerer Losbestand & mittlerer Lieferverszug</p>
--	--

Mit $BL_m(t)$ mittlerer Losbestand [ME]

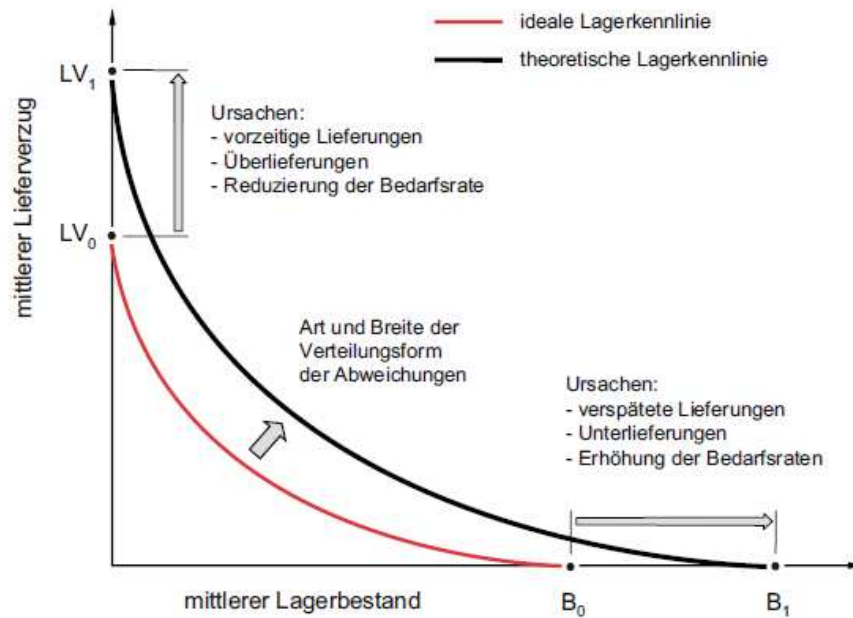
$LV_m(t)$ mittlerer Lieferverszug [BKT]

BL_1 praktisch minimaler Grenzbestand [ME]

LV_1 praktisch minimaler Grenzlieferverzug [BKT]

$0 \leq t \leq 1$ Laufvariable

C C_{NORM} - Parameter



IFA C3301

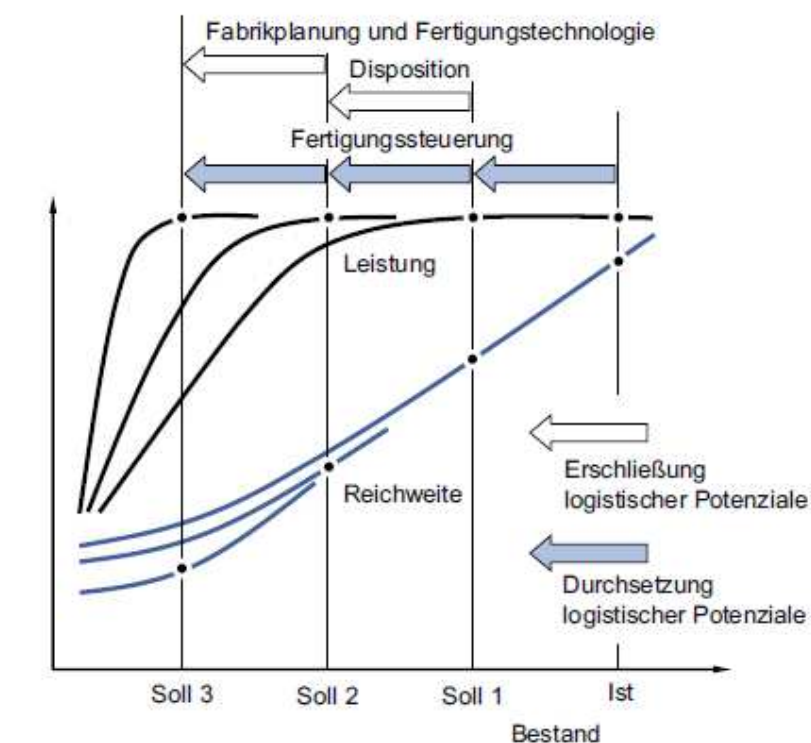
Abbildung 42: Einflussgrößen auf reale Lagerkennlinien¹⁹⁰

¹⁹⁰ Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.241

5 Fertigungsregelung auf Basis des Trichtermodells

5.1 Überprüfung der Einsatzmöglichkeit von Produktionskennlinien

Die Kennlinientheorie bietet weitreichende Möglichkeiten, logistische Rationalisierungspotentiale zu quantifizieren und Produktionsprozesse logistikorientiert zu gestalten und zu lenken. Um eine hohe Effizienz der einzuleitenden Maßnahmen sicherzustellen, ist es besonders wichtig, die einzelnen Maßnahmen aufeinander abzustimmen. Die permanente Absenkung des Bestandes ist dabei die zentrale Logistikstrategie. Die Grenzen der erreichbaren Durchlaufzeiten und Bestände lassen sich anschließend durch dispositive Maßnahmen, insbesondere durch gleichmäßigere Arbeitsinhalte, zu geringen Werten verschieben. Für die Erreichung des optimalen Betriebspunktes können weitere logistische Rationalisierungspotentiale durch die Umsetzung technologischer Maßnahmen erreicht werden.¹⁹¹



IFA C0736

Abbildung 43: Schritte zur Absenkung von Durchlaufzeit und Bestand in der Produktion¹⁹²

¹⁹¹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.159

¹⁹² Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.159

Da mit der Kennlinientheorie die Zusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen und ihre Beeinflussungsmöglichkeiten beschrieben werden, sind sie somit eine ideale Grundlage für den Ausbau und die Überwachung von Prozesssicherheit und Prozessfähigkeit eines Unternehmens. Sie zeigen auf, welche Durchlaufzeiten und Bestände bei den vorliegenden strukturellen Bedingungen erreicht werden können, ohne dass es zu nennenswerten Materialflussabbrüche und somit zu Leistungseinbußen kommt. Mit der Darstellung der logistischen Zielgrößen in einem Diagramm ist es möglich, je nach aktueller Betriebs- und/oder Marktsituation und auch in Abhängigkeit von arbeitssystemspezifischen Randbedingungen zu entscheiden. Gleichzeitig kann aufgezeigt werden, wie sich eine Parameteränderung auf die logistischen Qualitätsmerkmale auswirkt. Somit wird das Dilemma der Ablaufplanung gelöst. Statt nach einem imaginären Optimum (meist dem Kostenoptimum) zu suchen, geht man von einer primären, meist marktbedingten Zielgröße aus, z. B. einer angestrebten Durchlaufzeit. Daraus ergeben sich dann zwangsläufig die übrigen Zielwerte wie Auslastung und Bestand.¹⁹³

Überwachung und Ausbau der logistischen Prozeßsicherheit	Überwachung und Ausbau der logistischen Prozeßfähigkeit
Logistische Positionierung Festlegung anzustrebender Betriebsbereiche, Konsistenzprüfung der logistischen Zielgrößen	
Produktionscontrolling Prozeßbewertung, Ermittlung logistischer Rationalisierungspotentiale	Auswahl von Planungs- und Steuerungsstrategien Losgrößenbestimmung, Terminierung, Auftragsfreigabe
Produktionsplanung und -steuerung Vorgabe konsistenter Planungsparameter (Flußgrad, Durchlaufzeit, Übergangszeit, Bestand)	Auslegung der Produktionsstruktur Layoutplanung, Bewertung und Gestaltung von Prozeßketten

Tabelle 2: Einsatzmöglichkeiten von Produktionskennlinien bei der Gestaltung und Lenkung von Produktionsprozessen¹⁹⁴

¹⁹³ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.160

¹⁹⁴ Eigene Darstellung; Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.160

5.1.1 Anwendungsvoraussetzungen für Produktionskennlinien bei Werkstattfertigung und Fließfertigung

Um die grundsätzliche Übertragbarkeit der Betriebskennlinien auf Wertstrom-optimierte Produktionen zu ermitteln, ist zunächst zu prüfen, ob alle Anwendungsvoraussetzungen zum Einsatz von Betriebskennlinien bei Wertstrom-optimierten Produktionen erfüllt werden. Zum Einsatz von Produktionskennlinien müssen die zur Errechnung der Kennlinien benötigte Daten vorliegen, der Streckfaktor α muss ermittelbar sein und am Arbeitssystem muss ein eingeschwungener Prozesszustand zur Verfügung stehen.¹⁹⁵

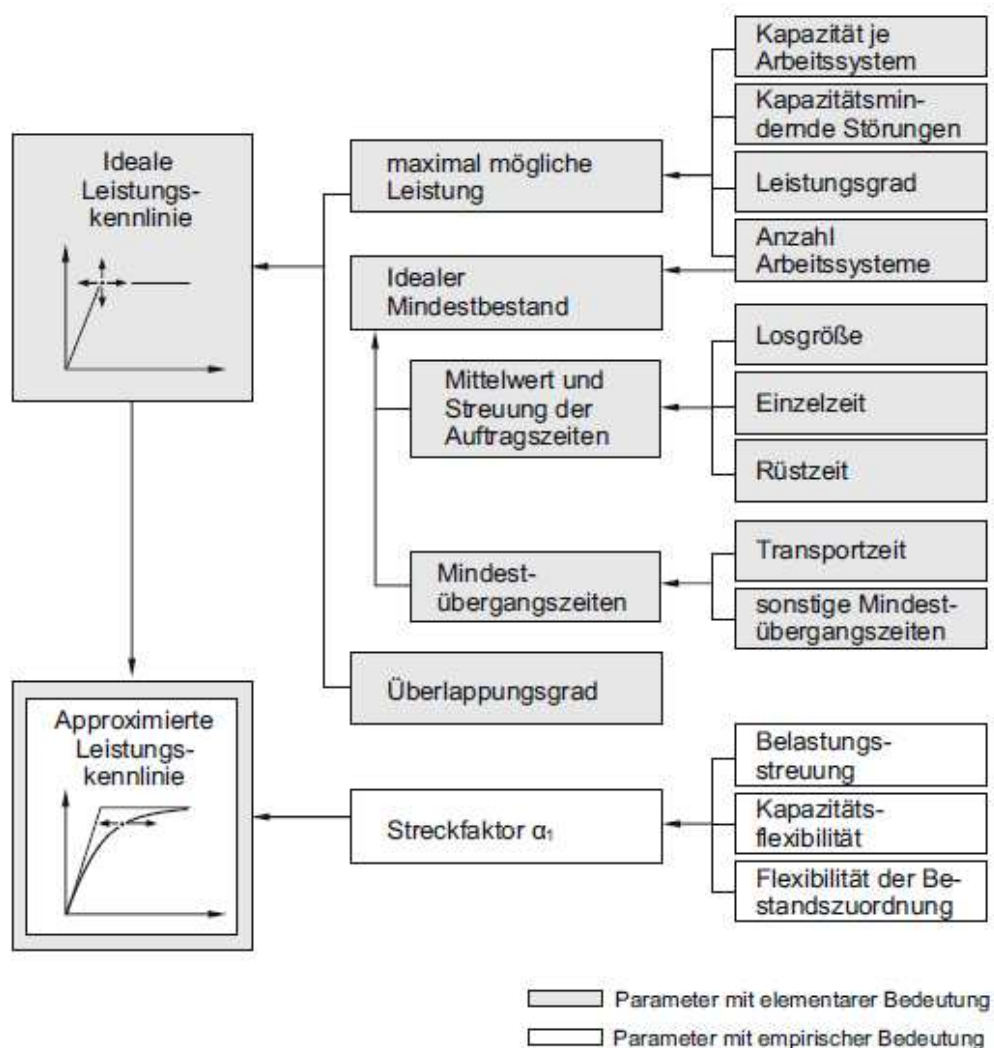


Abbildung 44: Parameter approximierter Leistungskennlinien¹⁹⁶

¹⁹⁵ Vgl. Elers, 2001, S.46

¹⁹⁶ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.116

Für jedes Arbeitssystem muss *die maximale Leistung* bestimmt werden. Die maximale Leistung eines Arbeitssystems ist unabhängig von der Anordnung im Materialfluss und von der Produktionsablaufart, deswegen dürfte es keinen Unterschied geben, die maximale Leistung bei wertstrom-optimierten Arbeitssystemen oder in Werkstattfertigungen zu berechnen.

Der *ideale Mindestbestand* ergibt sich aus Mittelwert und Streuung der Auftragszeiten und Mindestübergangszeiten. Der Mittelwert und die Streuung der Auftragszeiten können ermittelt werden, falls die Losgrößen, die Einzelzeiten und die Rüstzeiten der Aufträge bekannt sind. Die Losgrößen der Aufträge entsprechen bei wertstrom-optimierten Produktionen den Kanban-Mengen. Die Einzelzeiten sind beim Wertstrommodell die Zykluszeiten.

Bei der Ermittlung der *Mindestübergangszeiten* sollten keine nennenswerten Unterschiede zwischen Werkstattfertigungen und wertstrom-optimierten Produktionen bestehen. Die FiFo-Bahn ist eine Ausnahme. Die Transportstrecke wird auch zur Zwischenlagerung von wartenden Beständen benutzt. Bei den FiFo-Bahnen sollten daher keine Transportzeiten eingerechnet werden, da die Zeiten für den Transport schon in der Wartezeit der Bestände enthalten sind.

Im Grundmodell für Produktionskennlinien wird davon ausgegangen, dass die Aufträge losweise transportiert werden. Bei wertstrom-optimierten Fertigungen findet aber teilweise eine *überlappte Fertigung oder Montage* statt. So sind die Transportlosgrößen kleiner als die Produktionslosgrößen. Dies kommt vor allem bei der Fließfertigung und bei Sammel-Kanbansystemen vor. Beim Kennlinienmodell kann diese überlappte Fertigung oder Montage berücksichtigt werden, indem beim idealen Mindestbestand nicht die mittlere Auftragszeit der Aufträge, sondern die mittlere Auftragszeit der Teillose berücksichtigt wird.

Der *Streckfaktor* α lässt sich nur empirisch annähernd exakt bestimmen. Dazu wird mit einem realitätsnahen Simulationsmodell die Produktion abgebildet und es werden für jedes Arbeitssystem Betriebspunkte erzeugt, aus denen simulierte Leistungskennlinien abgeleitet werden können. Der Vergleich zwischen idealer und simulierter Kennlinie hilft bei der Bestimmung des Streckfaktors. Der Streckfaktor hängt im Wesentlichen von der Belastungsstreuung und der Kapitalflexibilität des betreffenden Arbeitssystems ab. Für Werkstattfertigungen ist häufig ein Wert von 10 ein guter Näherungswert für α . Beim wertstrom-optimierten Produktionen ist eine geringere Belastungsstreuung als bei Werkstattfertigungen zu erwarten. Neben der Simulation existiert noch ein Modell, mit dem sich mathematisch der α -Wert näherungsweise bestimmen lässt. Allerdings wird man bei wertstrom-optimierten Produktionen nicht schaffen, α mittels einer Simulation zu bestimmen, weil es noch keine Untersuchung bezüglich der Genauigkeit des mathematischen Modells im Vergleich zu den simulierten Kennlinien gibt.

Eine weitere Voraussetzung ist, dass ein *eingeschwungener Prozesszustand* herrscht. Dies ist notwendig, weil das Verhalten des Arbeitssystems über die Zeit bei den Kennlinien in verdichteter Form dargestellt wird. Die Verdichtung stellt sich über die Berechnung von Mittelwerten ein. Bei starken Schwankungen der Werte über die Zeit sind die berechneten Mittelwerte nicht aussagekräftig und das logistische Potential des Arbeitssystems kann nicht realistisch wiedergegeben werden.

Ein Kriterium für einen stabilen Prozesszustand ist, dass es zu keinen tendenziellen Veränderungen über die Zeit bei der Auftragszeitstruktur kommt. Die dürfte in der Regel bei wertstrom-optimierten Produktionen erfüllt sein, weil gerade beim Kanban-Prinzip eine Voraussetzung ein stetiger Teileverbrauch ist, der sich nur bei einer gleichmäßigen Auftragsstruktur realisieren lässt.

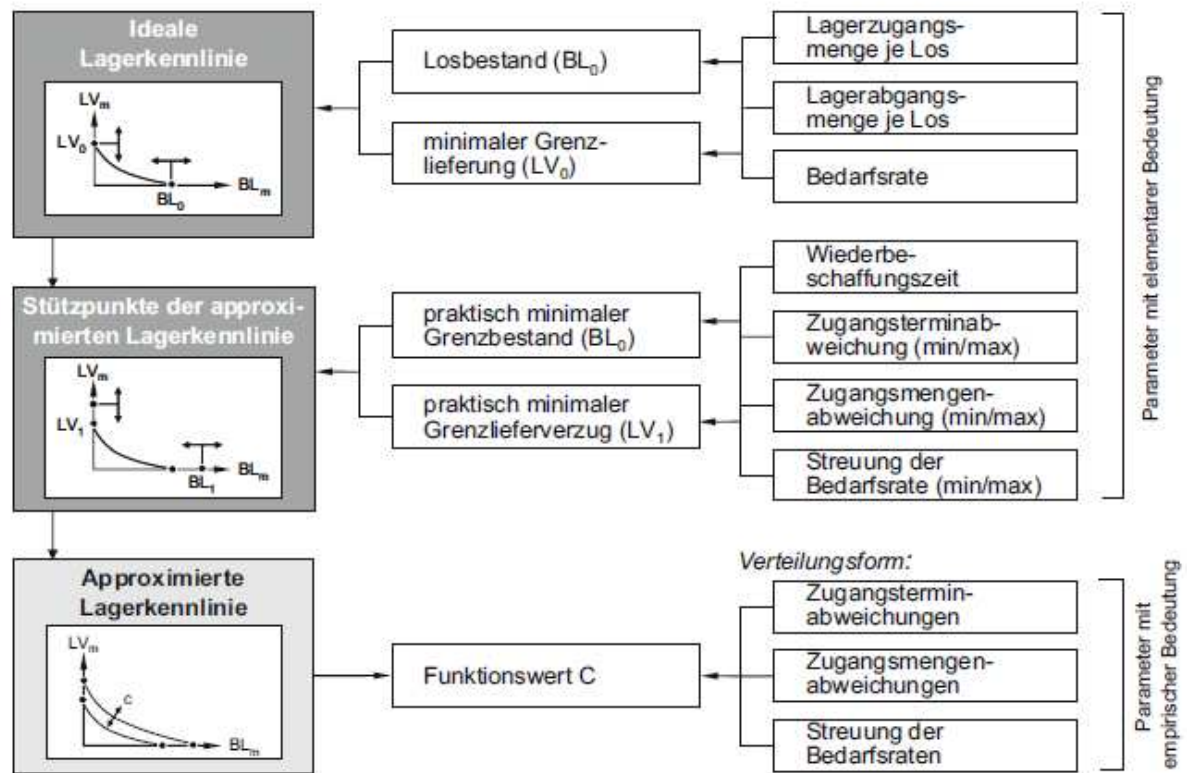
Ein zweites Kriterium für einen stabilen Prozesszustand ist, dass es zu keinen übermäßigen Schwankungen des Bestandes und zu keinem generellen Bestandsaufbau oder –abbau an den jeweiligen Arbeitssystemen kommt. Auch dieses Kriterium dürfte in der Regel von wertstrom-optimierten Produktionen erfüllt werden, da sie zu einem gleichmäßigen Produktionsfluss bei niedrigen Beständen führen. So sind bei den Fließfertigungen überhaupt keine Pufferbestände an den einzelnen Arbeitssystemen vorgesehen. Bei den Kanban-Supermärkten werden zwar Bestände vorgehalten, diese Pufferlager werden aber relativ klein ausgelegt und zeichnen sich durch einen fest definierten Bestand an Zwischenprodukten aus. Dasselbe gilt auch für die FiFo-Bahnen.¹⁹⁷

5.1.2 Anwendungsvoraussetzungen von Lagerkennlinien

Für die Abbildung von Kanban-Systemen und deren Supermärkte ist der Einsatz von Lagerkennlinien erforderlich. Die Daten mit elementarer Bedeutung sollten alle ermittelbar sein, sofern die Lagerzu- und –abgangsdaten in mengenmäßiger und zeitlicher Hinsicht an den Kanban-Supermärkten erfasst werden. Zugangsmengenabweichungen dürften nicht auftreten, weil bei einem Kanban-System nur komplette Kanban-Mengen abgeliefert werden dürfen.¹⁹⁸

¹⁹⁷ Vgl. Elers, 2001, S.46-51

¹⁹⁸ Vgl. Elers, 2001, S.52



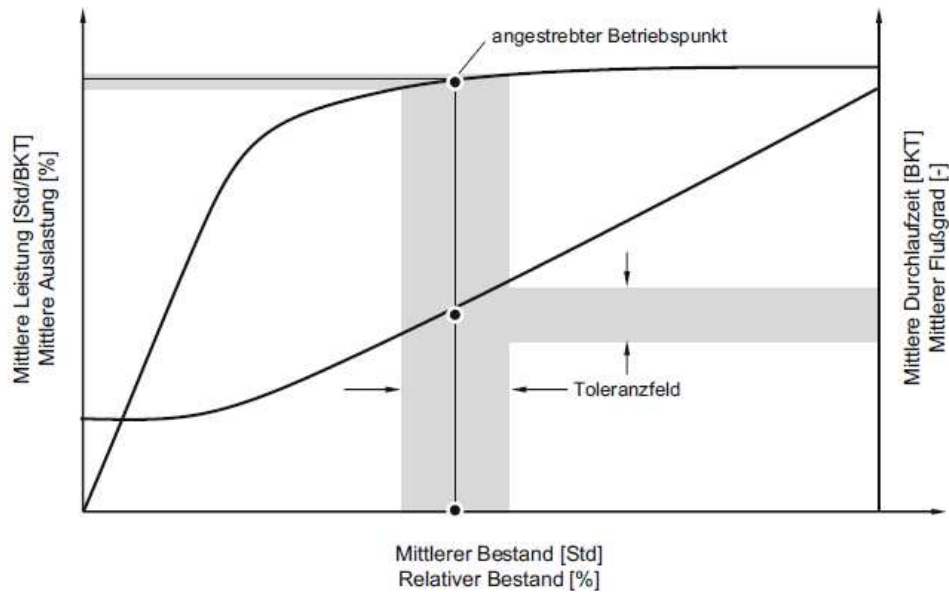
IFA D5736

Abbildung 45: Parameter berechneter Lagerkennlinien¹⁹⁹

5.2 Logistische Positionierung

In der betrieblichen Praxis ist der Widerspruch zwischen kurzen Durchlaufzeiten und geringen Beständen einerseits und einer hohen Auslastung andererseits allgemein bekannt, als Dilemma der Ablaufplanung, kann aber in der Regel nicht quantifiziert werden. Eine zielorientierte Positionierung in diesem Spannungsfeld ist auf der Basis von Erfahrungswerten möglich. Dabei bieten Produktionskennlinien eine effektive Hilfestellung, weil sie die Wirkzusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen qualitativ und quantitativ beschreiben. Abhängig von der Betriebssituation können den Zielgrößen eine unterschiedliche Gewichtung beigemessen werden, sodass die Parameter situationsabhängig eingestellt werden können.

¹⁹⁹ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.247



IFA D0976B

Abbildung 46: Logistische Positionierung mit Produktionskennlinien²⁰⁰

In Abhängigkeit von den vorliegenden Auftragszeit- und Kapazitätsstrukturen einerseits sowie den geforderten Lieferzeiten, dem Kapazitätsbedarf sowie der Kostenstruktur andererseits lassen sich die anzustrebenden Betriebspunkte für die einzelnen Arbeitssysteme bestimmen. Dieser Vorgang wird als logistische Positionierung definiert.²⁰¹ Mit der logistischen Positionierung legt ein Unternehmen den Plan-Bestand eines Arbeitssystems fest. Dieser von Wiendahl geprägte Begriff löst das von Gutenberg formulierte Dilemma der Ablaufplanung auf. Damit ist festgestellt, dass es weder theoretisch noch praktisch möglich ist, eine einzige praxisrelevante Optimierungsgröße zu definieren. Ziel dabei ist es, ausgehend von einer strategisch wichtigen primären Zielgröße (z. B. die Durchlaufzeit) einen konsistenten Wert für die übrigen Zielgrößen zu finden.²⁰² Bei einer logistischen Positionierung kann auch ausgedrückt werden, ob die angestrebten Ziele bei den bestehenden Rahmenbedingungen überhaupt erreichbar sind. Wenn dies nicht der Fall ist, liegen die Zielwerte nicht auf den berechneten Kennlinien. Es sind dann Maßnahmen zu ergreifen, mit denen ein neues logistisches Potential erschlossen werden kann.²⁰³

Als fünfte wesentliche logistische Zielgröße der Referenzprozesse wurden Kosten genannt. Die von der Logistik beeinflussbaren Kosten sind zu minimieren. Im Sinne der Kennlinientheorie ist es erforderlich, diese Kosten in Abhängigkeit vom Bestand

²⁰⁰ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.162

²⁰¹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.161

²⁰² Vgl. Lödding, 2008, S.73

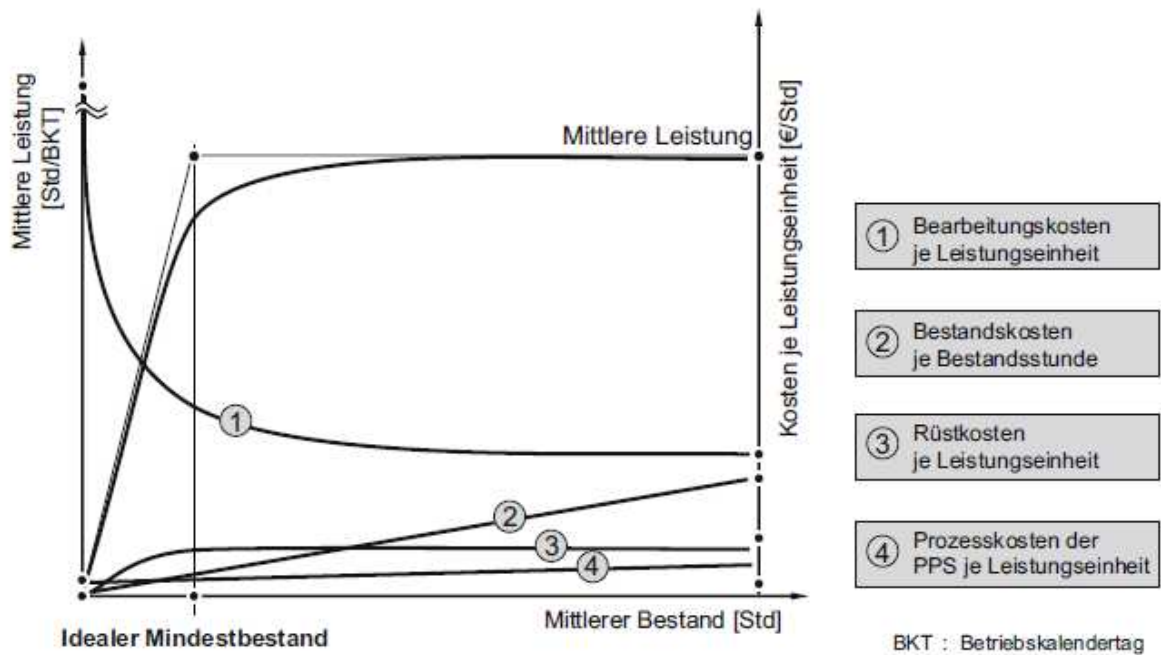
²⁰³ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.162

darzustellen, denn nur dann ist ein unmittelbarer Vergleich mit den anderen bestandsabhängigen Zielen wie Leistung, Durchlaufzeit und Termineinhaltung möglich.

Der von Kerner vorgeschlagene Ansatz entwickelt frühere Arbeiten von Weber und Großklaus weiter und führt sie zu einer pragmatischen Lösung auf Basis der Prozesskostenrechnung. Es sollen zunächst die Teilprozesse der Referenzprozesse definiert und ihnen die entsprechenden Kostenarten zugeordnet werden. Für jeden Teilprozess erfolgt anschließend die Bestimmung der Kostentreiber und der Prozesskostensätze. Schließlich sind in Abhängigkeit von der Zielgröße Bestand aus in Gleichungen zu überführen. Somit wird die Berechnung und graphische Darstellung einer Kostenkennlinie möglich.

“Die primären Teilprozesse eines Produktionsprozesses sind die Rüst- und Bearbeitungsvorgänge, deren Dauer aus den Arbeitsplänen zu entnehmen ist. Die Kosten des Rüstprozesses setzen sich aus Fertigungslöhnen, Sachkosten und Kapitalkosten für denjenigen Rüstzeitanteil zusammen, der die Inanspruchnahme der Maschine erfordert. Neben den rüst-, bearbeitungs- und bestandsbedingten Kosten des Produktionsprozesses sind schließlich noch die durch die Produktionsplanung und –steuerung bedingten Kosten zu berücksichtigen. Als Kostentreiber gelten hier die Anzahl Fertigungsaufträge und Arbeitsgänge. Die von Kerner identifizierten erforderlichen Teilprozesse sind: Produktionsprogramm, Losgrößen und Produktionsreihenfolge planen, Auftragspapiere erstellen, Aufträge freigeben, Maschinenbelegung planen, Fertigungsfortschritt kontrollieren und fertige Aufträge zurückzumelden. Dann lassen sich entsprechend den Kosten für Personal, Raumkosten, Abschreibungen und Zinsen für das PPS-System die Kosten je Auftrag bestimmen.”²⁰⁴

²⁰⁴ Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.176



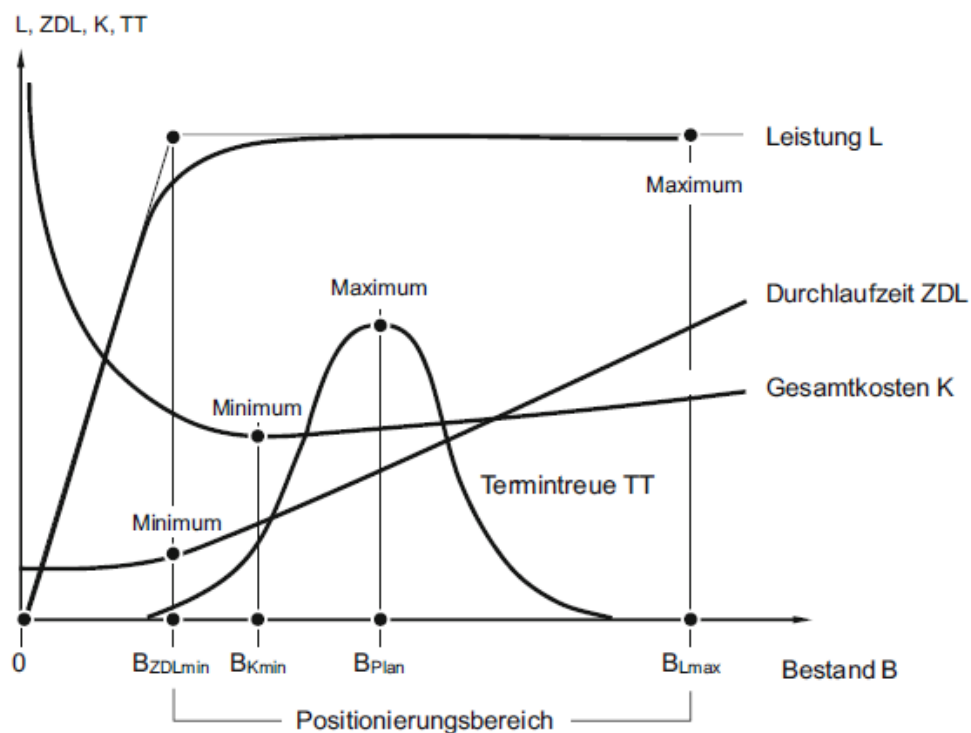
IFA 10.415

Abbildung 47: Prinzipieller Verlauf der Prozess- und Bestandskosten des Produktionsprozesses in Abhängigkeit vom Bestand²⁰⁵

Die Bearbeitungskostenkurve liegt zwischen zwei Werten. Bei Erreichen der maximalen Leistung (rechter Punkt) entstehen keine Leerkosten, die Bearbeitungskosten je Leistungseinheit erreichen ein Minimum und entsprechen dem Plankostenstundensatz. Bei sinkender Leistung müssen die Fixkosten auf immer weniger Stunden verteilt werden, der Grenzwert der Bearbeitungskosten strebt daher theoretisch gegen unendlich. Der Verlauf der Rüstkosten ist demgegenüber unabhängig von der Leistung und dem Bestand des Arbeitssystems, weil der Rüstprozess immer an den jeweils bearbeiteten Auftrag gebunden ist. Die Bestandskosten sind bis zum Erreichen des idealen Mindestbestandes konstant und steigen von dort linear mit dem Bestand an. Schließlich sind die durch Planung und Steuerung bedingten Kosten ausgehend von einem bestandsunabhängigen Mindestwert linear abhängig vom Bestand. Wenn man nun die Werte der vier Kostenarten aufsummiert, entsteht eine Gesamtkostenkennlinie, die zusammen mit der Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinie sowie der Termintreuekennlinie zeigt. Man erkennt, dass jede Kurve einen Minimal- bzw. Maximalwert besitzt, dem je ein Bestandswert zugeordnet ist. Prinzipbedingt können sich diese Werte für die minimale Durchlaufzeit ($BZDL_{\min}$), die minimalen Kosten (BK_{\min}), die maximale Leistung (BL_{\max}) und die maximale Termintreue (B_{Plan}) nicht decken. Dadurch ergibt

²⁰⁵ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.177

sich ein möglicher Positionierungsbereich für den Bestand. Welcher Wert letztlich für den Bestand gewählt wird, hängt von der primär verfolgten Zielsetzung ab.²⁰⁶



IFA 10.415

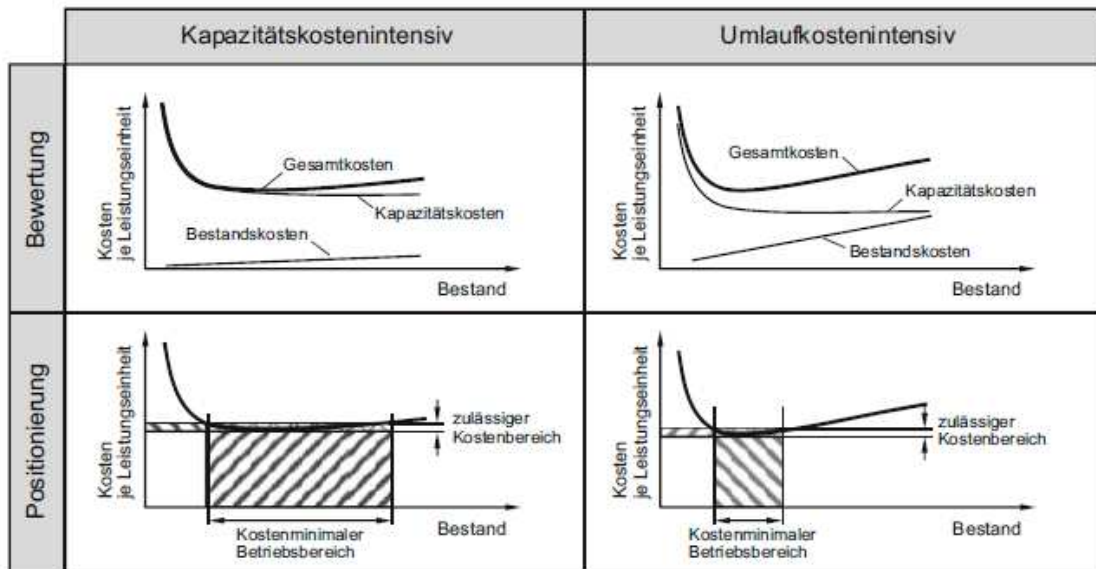
Abbildung 48: Prinzipieller Verlauf von Leistung, Durchlaufzeit und Kosten eines Arbeitsplatzes abhängig vom Bestand²⁰⁷

Der Verlauf der Gesamtkostenkurve wird aufgrund ihrer Bestandteile wesentlich durch das Verhältnis der Kapazitätskosten zu den Bestandskosten deutlich gemacht. Je stärker die Kapazitätskosten gegenüber der Bestandskosten dominieren, desto flacher ist der Bereich des Gesamtkostenminimums. Wenn man nun eine zulässige Abweichung der Kosten vom Minimalwert von beispielsweise 5% zugrundelegt, entsteht ein Betriebsbereich für den Bestand, der umso enger ist, je stärker die Bestandskosten dominieren. In diesem Fall wird man sich eher am Kostenminimum orientieren. Wenn hingegen die Kapazitätskosten vorherrschen, ist der kostenminimale Bereich bei gleicher Kostentoleranz deutlich breiter und es können eher niedrige Durchlaufzeiten angestrebt werden.²⁰⁸

²⁰⁶ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.177ff

²⁰⁷ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.178

²⁰⁸ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.177ff



IFA C3050

Abbildung 49: Einfluss der Kostenstruktur auf den kostenminimalen Betriebsbereich²⁰⁹

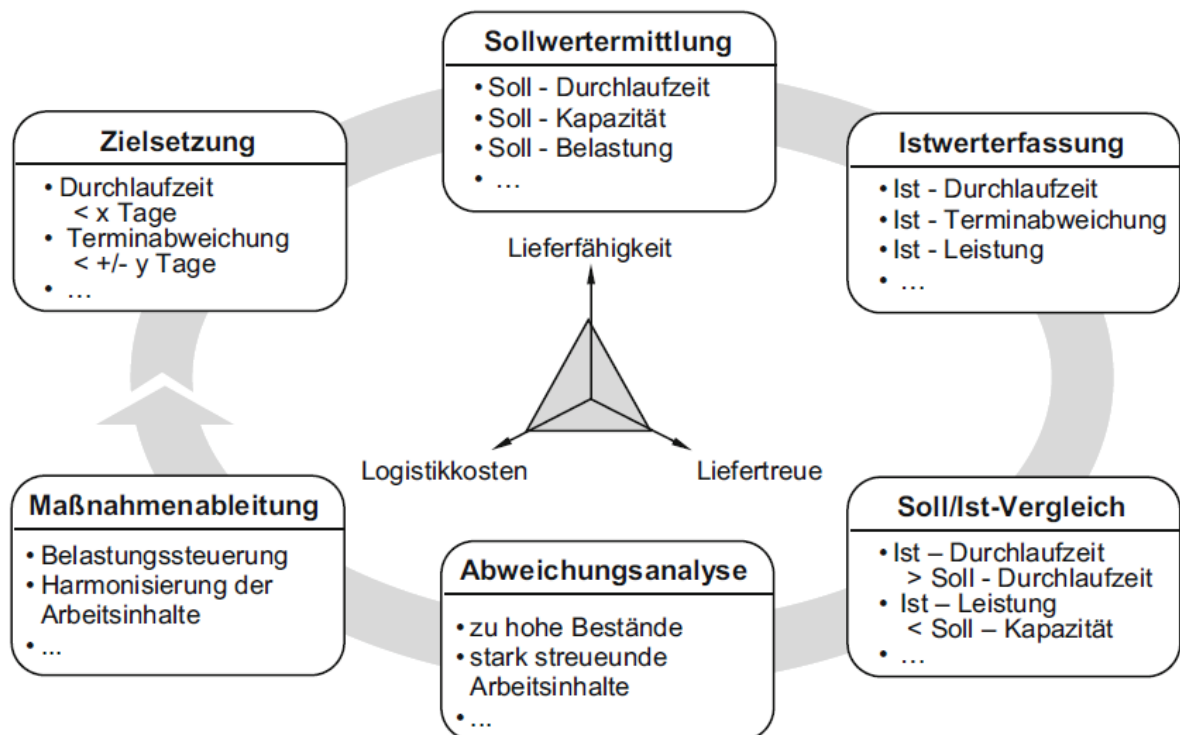
„Die Bewertung der Durchlaufzeit und auch der Terminabweichung entzieht derzeit noch einer kostenmäßigen Beschreibung, da sie eher erlöswirksam sind. Hier sind noch weitere Arbeiten erforderlich.“²¹⁰ Es lässt sich jedoch aussagen, dass kurze Durchlaufzeiten und geringe Terminabweichungen generell eine Verschiebung des kostenoptimalen Bereichs in Richtung geringerer Bestände zur Folge haben.²¹¹

²⁰⁹ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.163

²¹⁰ Nyhuis/Wiendahl, 2012, S.179

²¹¹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.164

5.3 Kennlinieneinsatz im Rahmen des Produktionscontrolling



IFA C2006

Abbildung 50: Der Controlling-Regelkreis²¹²

Bei der Methode des Produktionscontrollings werden auf Basis der rückgemeldeten Planungsgrößen die logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand und Termineinhaltung kontrolliert. Die Einzelschritte eines Produktionscontrollings sind wie folgt beschrieben: Nachdem die Zielsetzung und die Sollwertermittlung im Rahmen der logistischen Positionierung erfolgt ist, sind die Kennlinien in Verbindung mit den Durchlaufdiagrammen im Anschluß an die Datenerfassung und –auswertung zum Soll/Ist-Vergleich, zur Abweichungsanalyse und zur Maßnahmenableitung geeignet.²¹³

5.4 Engpassorientierte Logistikanalyse

Die Engpassorientierte Logistikanalyse (ELA) ist ein Controlling-Ansatz, der speziell für die logistikorientierte Bewertung und Verbesserung von bestehenden Produktionsprozessen gestaltet wurde. „Über eine solche Analyse lassen sich die Prozessabläufe aus logistischer Sicht sowohl qualitativ als auch quantitativ

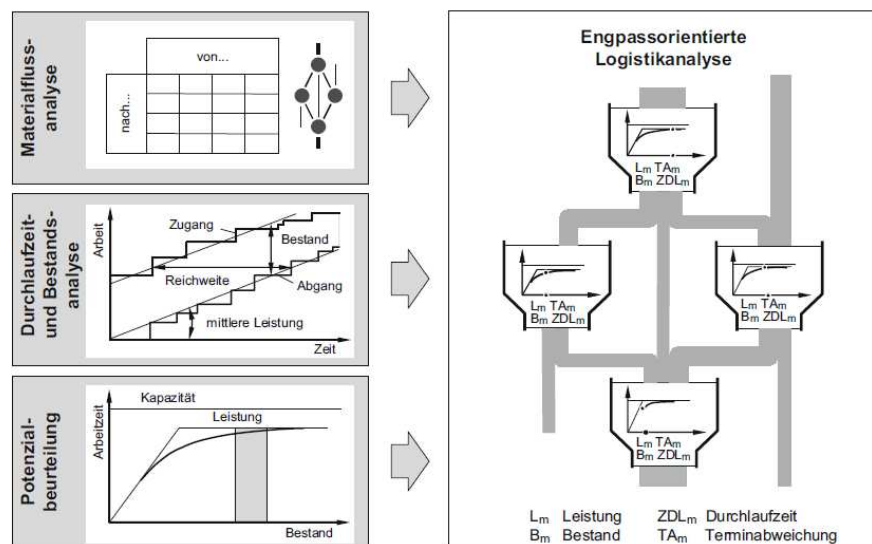
²¹² Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.164

²¹³ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.165

beschreiben. Problemursachen lassen sich lokalisieren und darstellen, zunächst können vorhandene logistische Rationalisierungspotentiale, ebenso wie mögliche Maßnahmen zu ihrer Erschließung, aufgezeigt und bewertet werden.“²¹⁴

„Von Nyhuis und Wiendahl wurde die auf Kapazitäts- und Durchlaufzeitengpässe fokussierte Methode zur zielgerichteten Analyse der Durchlaufzeit- und Bestandssituation in Produktionsbereichen und zur Überprüfung der Wirksamkeit von bestandssenkenden und durchlaufzeitverkürzenden Maßnahmen entwickelt.“²¹⁵ Die ELA besteht aus der Kombination der Analysetechniken „Materialflussanalyse“, „Durchlaufzeit- und Bestandsanalyse“ und „logistische Potenzialbeurteilung mit Produktionskennlinien“.²¹⁶

Basierend auf der rückgemeldeten Daten wird durch eine Auftragsdurchlaufzeit- und Materialflussanalyse die auslastungskritischen und durchlaufzeitbestimmenden Arbeitssysteme ermittelt. Ziel dieser Analyse ist es, das Bestandssenkungs- und Durchlaufzeitverkürzungspotenziale für jedes einzelne Arbeitssystem zu ermitteln. Anschließend werden für die ausgewählten Arbeitssysteme geeignete Ansatzpunkte abgeleitet, um das identifizierte Potential freizusetzen. Der Vorteil der ELA ist, dass sie in strukturierter Weise den Entscheider auf die Engpässe im Produktionsablauf aufmerksam macht und das mögliche logistische Rationalisierungspotenzial durch Vergleich mit einem bestmöglichen Betriebszustand darlegt.²¹⁷



IFA C0340

Abbildung 51: Engpassorientierte Logistikanalyse²¹⁸

²¹⁴ Nyhuis, 2008, S.207

²¹⁵ Kerner, 2002, S.35

²¹⁶ Vgl. Nyhuis, 2008, S.207

²¹⁷ Vgl. Kerner, 2002, S36

²¹⁸ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1999, S.166

5.5 Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung

5.5.1 Allgemeines Losgrößenbestimmungsverfahren

Die in der Bedarfsrechnung ermittelten Bedarfe an Teilen werden in der Regel nicht unmittelbar als Fertigungsaufträge in die Werkstatt gegeben, sondern es wird versucht, die Bedarfe zu Losen zusammenzufassen. Dabei sollen die Gesamtkosten für einen Dispositionszeitraum minimiert werden. Dieser stellt eine in der Zukunft liegende wählbare Zeitdauer dar. Dann ergeben sich die Gesamtkosten k zu:²¹⁹

$k = m \cdot s + (m/x) \cdot \sum_1^n E_i + (p \cdot s \cdot x) / 200$	(5.1) Gesamtkosten im Dispositionszeitraum
--	--

mit k Gesamtkosten im Dispositionszeitraum [Euro]

m Bedarf im Dispositionszeitraum [Stück]

s losunabhängige Herstellkosten [Euro]

$\sum_1^n E_i$ Summe der Auftragswechselkosten je Los [Euro]

p Lagerhaltungskostensatz [%]

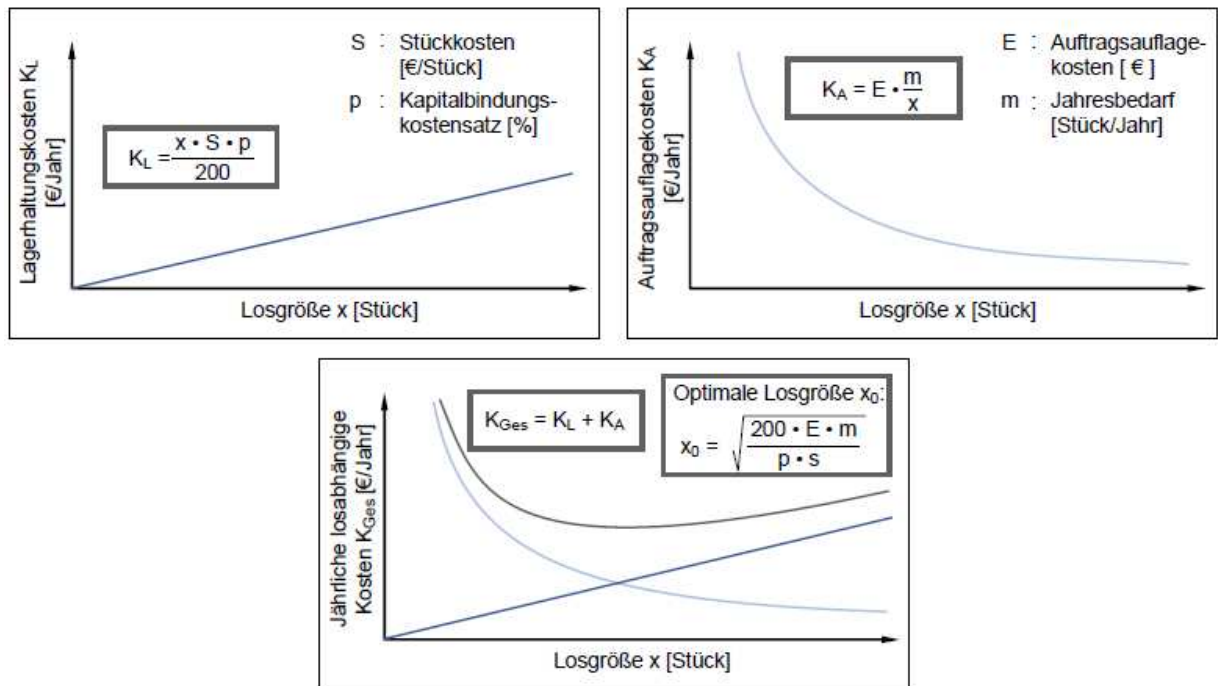
x Losgröße [Stück]

Man erkennt in der Gleichung drei Anteile: die *losunabhängigen Gesamtkosten*, die *Auftragswiederholkosten* als Produkt der Auflegungshäufigkeit und den Auftragswechselkosten sowie die *Zins- und Lagerhaltungskosten* für den durchschnittlichen Bestand im Fertigwarenlager. Dabei wird von einem linearen Verbrauch ausgegangen.

Zur Bestimmung der wirtschaftlichen Losgröße x_0 ist diese Gleichung nach x zu differenzieren und Null zu setzen. Sie ergibt sich dann zu:

$x_0 = \sqrt{\frac{200 \cdot m \cdot \sum_1^n E_i}{p \cdot s}}$	(5.2) Losgröße nach Andler
---	----------------------------

²¹⁹ Vgl. Wiendahl, 1997, S. 261

Abbildung 52: Losgrößenbestimmung nach Andler²²⁰

Das Grundmodell der Losgrößenplanung aus dem Jahre 1915 stammt von Harris und Wilson. Dieses Modell wird 1929 von K. Andler weiterentwickelt und ist auch als Losgrößenformel von Andler bzw. als Economical Order Quantity Modell (EOQ) bekannt. In der klassischen Losgrößenplanung werden die Rüstkosten und die Lagerkosten betrachtet und die kostenoptimale Losgröße bestimmt.

Wenn in Losen produziert wird, können die gefertigten Mengen in der Regel nicht direkt an den Abnehmer weitergegeben werden und die gefertigten Produkte müssen zwischengelagert werden. So entstehen Aufwände in Form von Kapitalbindungskosten und Lagerplatzbedarf. Im Sinne einer Reduzierung der Lagerbestände und einer damit verbundenen Senkung der Kapitalbindungskosten sind daher kleine Losgrößen anzustreben.

Hierbei wird jeweils von einer vernachlässigbar kleinen Zeitdauer für den Bestandszugang und einem gleichmäßigen Verbrauch über die Zeit ausgegangen. Als mittlerer Bestand stellt sich dann gerade die Hälfte des Maximalbestandes ein. Dieser Bestand lässt sich durch Aufteilung in kleinere Produktionseinheiten, also kleinere Lose reduzieren.

Die Losgrößenplanung beruht auf der Abwägung:

- „Wenige große Lose mit zunehmenden Lagerhaltungskosten, aber geringen Rüstkosten zu bilden oder

²²⁰ Quelle: Fischer/Busse, 2006, S.7

- *Viele kleine Lose mit hohen Rüstkosten, aber geringen Lagerhaltungskosten zu fertigen.*²²¹

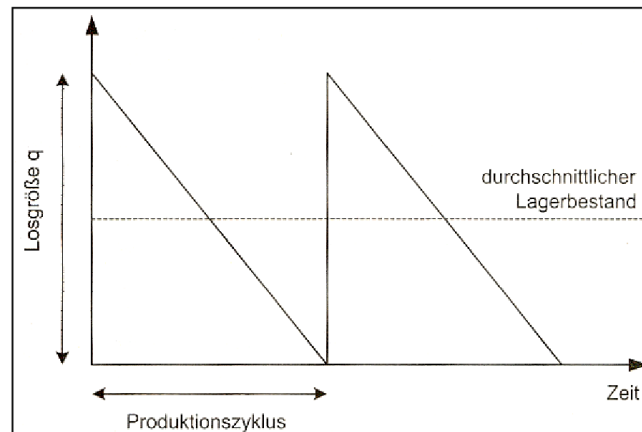


Abbildung 53: Entwicklung des Lagerbestands im klassischen Losgrößenmodell²²²

Bei diesem Modell sind die wichtigsten Voraussetzungen:²²³

- *„Die Kosten je Einheit sind unabhängig von der Losgröße.*
- *Der Bedarf ist bekannt und konstant.*
- *Fehlmengen sind nicht zugelassen.*
- *Die Produktionsgeschwindigkeit ist unendlich groß, d. h. die Kapitalbindung im Fertigungsprozess bleibt unberücksichtigt.*
- *Die Kosten für die Lagerung und den Auftragswechsel lassen sich hinreichend genau bestimmen.*
- *Die Fertigungs- und Lagerkapazitäten sind unbegrenzt.*
- *Es liegt eine einstufige Fertigung vor.“*

5.5.2 Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung

Die meisten Losgrößenbestimmungsverfahren berücksichtigen dabei mehr oder weniger detailliert, die über die Losgröße gegenläufigen Kosten für Lagerhaltung einerseits und die Auftragswechselkosten andererseits. Die klassischen Losgrößenbestimmungsverfahren berücksichtigen den Einfluss der Losgrößen auf die Durchlaufzeiten und die Bestandsbindung in der Produktion nicht.

Die Kennlinientheorie zeigt, dass die minimal erreichbaren Durchlaufzeiten maßgeblich durch den Mittelwert und die Streuung der Auftragszeiten und damit

²²¹ Greiling, 1997, S.23

²²² Quelle: Greiling, 1997, S.24

²²³ Wiendahl, 1997, S. 262

durch die Fertigungslosgrößen bestimmt werden. Damit sind sowohl die Durchführungszeiten wie auch die Liegezeiten in der Produktion losgrößenabhängige Kapitalbindungszeiten und somit in die Berechnung wirtschaftlicher Losgrößen einzubeziehen.

So setzt das Verfahren der *durchlauforientierten Losgrößenbestimmung* auf, aus der Kennlinientheorie ableitbaren Aussagen über den Zusammenhang von Arbeitsinhalten und damit Losgrößen einerseits und den logistischen Zielgrößen andererseits. Dieses Verfahren ist dadurch ausgezeichnet, dass die Kapitalbindung während des vollständigen Auftragsdurchlaufs von der Produktion aufgebaut wird, indem der in der Positionierung festgelegte Wert für den Flußgrad zur Ermittlung der bestandswirksamen Zeiten berücksichtigt wird.²²⁴

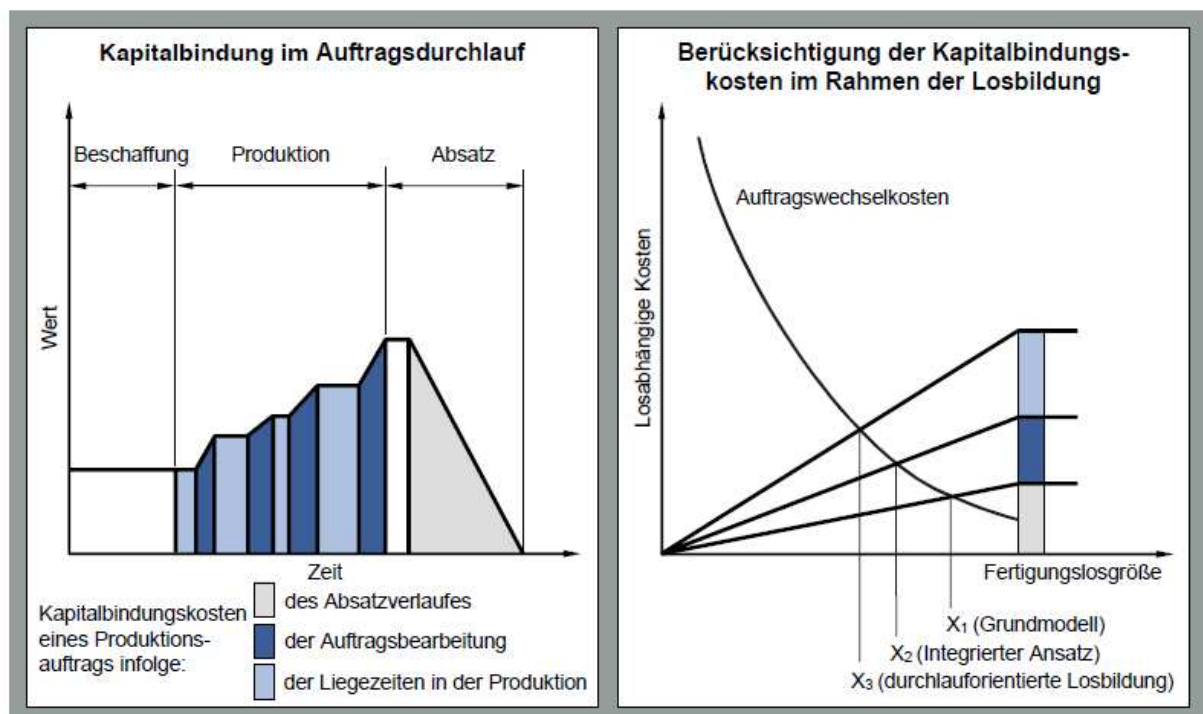


Abbildung 54: Das Prinzip der Durchlauforientierten Losgrößenbestimmung²²⁵

Bei Abbildung 54 auf der linken Seite wird der Verlauf der Kapitalbindung eines Loses beginnend mit dem Wert des eingekauften Materials über die einzelnen Arbeitsgänge mit Durchführungszeit und Liegezeit bis zum Verbrauch der Teile durch Entnahme aus dem Lager veranschaulicht. Das rechte Bild zeigt, dass gegenüber dem Grundmodell von Andler der integrierte Ansatz deutlich kleinere Losgrößen

²²⁴ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1997, S.167

²²⁵ Quelle: Nyhuis/Wiendahl, 1997, S.168

errechnet und der durchlauforientierte Ansatz zu einer weiteren Losgrößenreduktion führt.²²⁶

$x_0 = \sqrt{\frac{200 \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n E_i}{p \cdot s + \left(\frac{(S + S_0) \cdot p \cdot m \cdot FG}{60 \cdot DZ} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{te_i}{KAP} \right)}}$	(5.3) Losgröße nach durchlauforientierten Losgrößenbestimmung
---	---

Als primären Einfluß werden gegenüber klassischen Ansätzen kleinere wirtschaftlich optimale Losgrößen berechnet. Dabei werden Lose mit tendenziell großen Arbeitsinhalten stärker reduziert als Lose mit kleinen Arbeitsinhalten. Dieses Verfahren ist somit für eine Reduzierung und Harmonisierung der Auftragszeiten verantwortlich.²²⁷

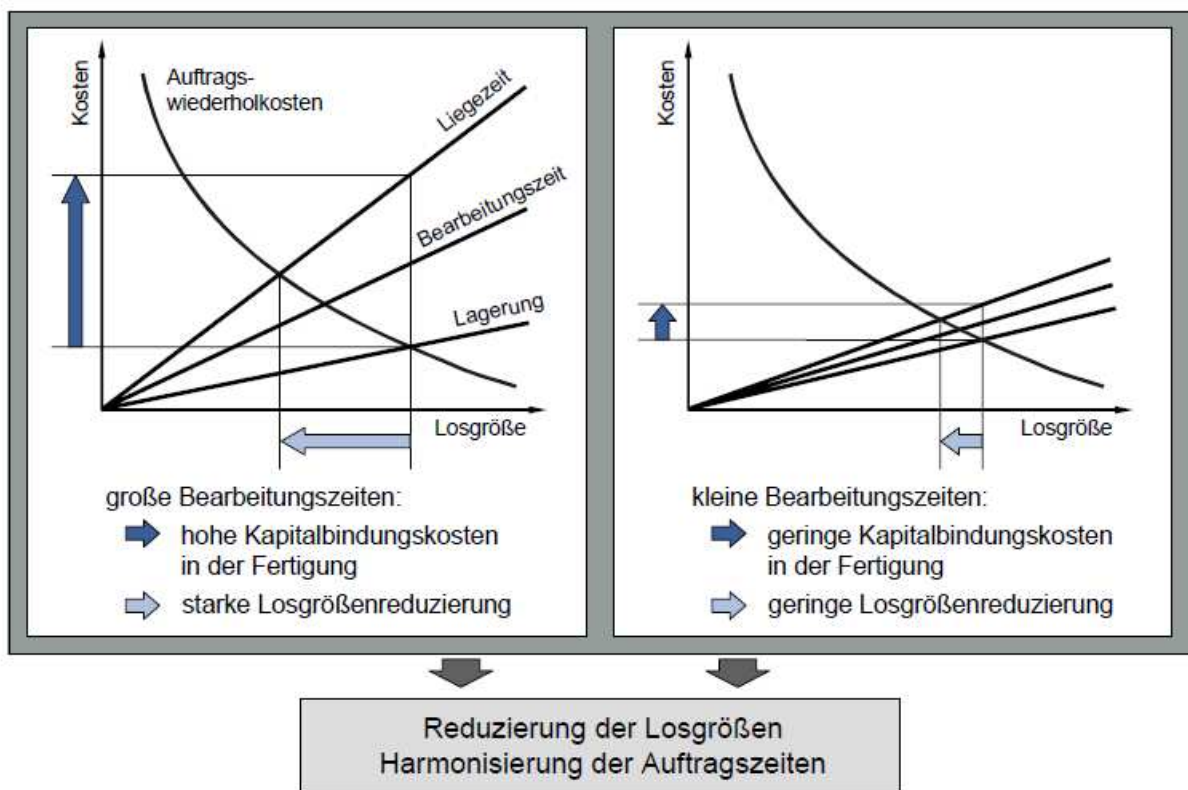


Abbildung 55: Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung²²⁸

²²⁶ Vgl. Wiendahl, 1997, S. 264

²²⁷ Vgl. Nyhuis/Wiendahl, 1997, S.167

²²⁸ Quelle: Fischer/Busse, 2006, S.13

Zu den logistischen Vorteilen der durchlauforientierten Losgrößenbestimmung zählen:²²⁹

- „Teile mit großen Durchführungszeiten und damit großen Herstellkosten werden gegenüber Teilen mit geringeren Durchlaufzeiten eine stärkere Losgrößenreduktion erfahren. Dies bedeutet eine Vergleichmäßigung der Arbeitsinhalte.“
- Eine Vergleichmäßigung der Arbeitsinhalte der Fertigungsaufträge bedeutet aber gegenüber einer stärker streuenden Verteilung eine neue Betriebskennlinie mit einem geringeren Mindestbestand und damit geringeren Mindestdurchlaufzeiten.
- Bei gleichem Flussgrad lassen sich damit in der Fertigung geringere Bestände und damit geringere Auftragsdurchlaufzeiten realisieren.
- Geringere mittlere Durchlaufzeiten bedeuten aber auch eine geringere Streuung und damit eine Verbesserung der Liefertreue.“

Losabhängige Kosten								
Losabhängige Kosten	=	Auftragswechselkosten	+	Lagerhaltungskosten	+	Fertigungsbestandskosten (Durchführungszeit)	+	Fertigungsbestandskosten (Übergangszeit)
K_L	=	$\frac{m}{x} \cdot E$	+	$\frac{p \cdot s \cdot x}{200}$	+	$\frac{(s + s_0) \cdot p \cdot m}{200 \cdot UZ} \cdot \Sigma ZDF$	+	$\frac{(s + s_0) \cdot p \cdot m}{200 \cdot UZ} \cdot \Sigma ZUE$

Berechnung optimaler Losgrößen $\frac{dK}{dx} = 0$	
Grundmodell (ANDLER): $X_{01} = \sqrt{\frac{200 \cdot m \cdot \Sigma E}{p \cdot s}}$	Durchlauforientierte Losbildung: $X_{03} = \sqrt{\frac{200 \cdot m \cdot \Sigma E}{p \cdot s + \frac{(s + s_0) \cdot p \cdot m \cdot FG}{60 \cdot UZ} \cdot \Sigma \frac{t_e}{KAP}}}$

Variablen	
K_L : Losabhängige Kosten [€] m : Bedarf [Stück] s : Herstellkosten [€/Stück] E : Auftragswechselkosten [€] p : Kapitalbindungssatz [%]	s_0 : Materialkosten [€/Stück] t_e : Bearbeitungszeit [min/Stück] KAP : Kapazität je Tag [Std/BKT] UZ : Dispositionszeitraum [BKT] FG : Flußgrad [-] ((ZDF + ZUE)/ZDF) ZDF : Durchführungszeit [BKT] ZUE : Übergangszeit [BKT]

Abbildung 56: Andler`sche Losgrößenformel & Durchlauforientierte Losgrößenformel²³⁰

²²⁹ Wiendahl, 1997, S. 264f

²³⁰ Quelle: Fischer/Busse, 2006, S.12

5.6 Einbindung des Kundentaktes und des EPEI in die Produktionskennlinien

Der Grad der *Einhaltung des Kundentaktes* an einem Arbeitssystem wird ersichtlich, wenn die Ist-Produktion mit dem Kundenbedarf verglichen wird. Dies entspricht dem Vergleich zwischen der mittleren Ist-Leistung L_m am Arbeitssystem (realer Betriebspunkt) und der mittleren Leistung, die die Produktion des Kundenbedarfs erfordert (Soll-Betriebspunkt). Aufgrund mangelnder Takteinhaltung kann es zu einem Bestandsaufbau kommen, der dazu führt, dass sich der reale Betriebspunkt weiter rechts als der Soll-Betriebspunkt auf der Produktionskennlinie befindet. Zur Ermittlung des Soll-Betriebspunktes wird der tägliche Kundenbedarf in Stück in die Einheit Vorgabestunden umgerechnet. Der Soll-Betriebspunkt liegt am Punkt, an dem sich der umgerechnete tägliche Kundenbedarf mit der Leistungskennlinie des Arbeitssystems schneidet.²³¹

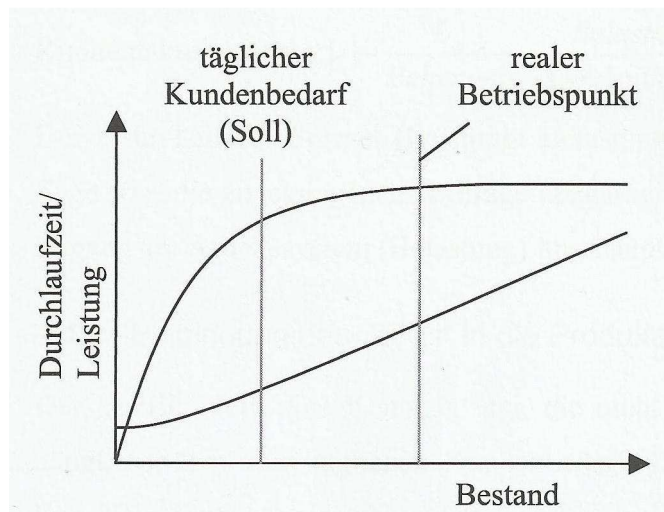


Abbildung 57: Darstellung des Kundentaktes bei den Produktionskennlinien²³²

Rechnerisch bedeutet die Takteinhaltung das Verhältnis zwischen der mittleren täglichen Leistung am Arbeitssystem und dem täglichen Kundenbedarf in Vorgabestunden.²³³

$\text{Kundentakteinhaltung} = \frac{L_m}{\text{Kundenbedarf}}$	(5.4) Kundentakteinhaltung
---	----------------------------

Werte, die nahe bei 1 liegen, deuten auf eine gute Takteinhaltung hin; die unter 1 liegen, zeigen, dass am Arbeitssystem weniger als der nötige Kundenbedarf

²³¹ Vgl. Elers, 2001, S.70f

²³² Quelle: Elers, 2001, S.71

²³³ Vgl. Elers, 2001, S.71

produziert wird. Werte, die über 1 liegen, deuten hingegen auf eine Überproduktion am Arbeitssystem hin. Eine Voraussetzung dabei ist, dass beim Arbeitssystem ein eingeschwungener Prozesszustand vorliegt. Für die Ursachenanalyse bezüglich der mangelnden Takteinhaltung ist es sinnvoll, die Formel für die Einhaltung des Kundentaktes in zwei Bestandteile aufzugliedern:²³⁴

$\text{Kundentakteinhaltung} = \frac{L_m}{\text{Belastung}} \cdot \frac{\text{Belastung}}{\text{Kundenbedarf}}$	(5.5) Kundentakteinhaltung
---	----------------------------

Der erste Teil der Formel zeigt, inwieweit das Arbeitssystem in der Lage war, die zugegangenen Aufträge abzuarbeiten. Der zweite Teil zeigt, ob der Zugang am Arbeitssystem überhaupt mit dem Kundenbedarf übereinstimmte.

Der *EPEI* (*Every Part Every Intervall*) bedeutet die Variantenflexibilität eines Produktionsprozesses und entspricht dem Zeitraum, der benötigt wird, um die Rüstfolge über alle Varianten einmal komplett zu durchlaufen. „Der *EPEI*-Wert im Ist-Zustand eines Produktionsprozesses ergibt sich aus der Summe der Bearbeitungszeit für alle Produktvarianten in den jeweils vorgegebenen Losgrößen zuzüglich der notwendigen Rüstzeiten sowie geplanter und ungeplanter Stillstände. Dieser Wert besagt, wie lange es unter den aktuellen Bedingungen dauert, bis alle Varianten einmal produziert worden sind.“²³⁵ Der vom *EPEI* dargestellte Kennzahl hängt nicht vom Bestandsniveau ab, sondern hängt vom täglichen Kundenbedarf ab. Der *EPEI* kann daher nicht in Form einer Kennlinie in Abhängigkeit vom Bestand in die Produktionskennlinien integriert werden. Deswegen ist die Formel zur Berechnung des *EPEI* so umzuformen, dass der *EPEI* mit Hilfe der Daten zur Berechnung der Produktionskennlinien ermittelt werden kann.

Der *EPEI* lässt sich folgendermaßen berechnen (*EPEI* korrigiert durch die technische Verfügbarkeit).²³⁶

$EPEI_v = \frac{\sum BZ + \sum RZ}{\#Res \times V \times AZ} = \frac{\#Var}{\#Res \times V} \times \frac{((LG \times BZ) + RZ)}{AZ}$	(5.6) <i>EPEI</i> -Wert
--	-------------------------

Mit $EPEI_v$ *EPEI*-Wert unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit [BKT]

#Var Anzahl der Varianten [Stück]

²³⁴ Vgl. Elers, 2001, S.71f

²³⁵ Erlach, 2010, S.72f

²³⁶ Erlach, 2010, S.73

#Res	Anzahl gleicher Ressourcen [Stück]
BZ	Durchschnittliche Bearbeitungszeit pro Stück [Std]
LG	Losgröße [Stück]
RZ	Rüstzeit [Std]
AZ	tägliche Arbeitszeit [Std/BKT]
V	Verfügbarkeit

Um z. B. einen EPEI-Wert von 1 an einem Prozess zu erreichen, muss das Arbeitssystem in der Lage sein, in der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit den Tagesbedarf für alle Typenvarianten produzieren können. Es muss dabei auch genügend Zeit zum Rüsten zur Verfügung stehen. Wenn die für das Umrüsten verbleibende Zeit kleiner als die Gesamtrüstzeit für alle Typenvarianten ist, so liegt der EPEI-Wert am Prozess über 1.²³⁷

²³⁷ Vgl. Elers, 2001, S.72

6 Beziehung zwischen Losgröße und Bestand

Um die Beziehung zwischen Losgröße und Bestand näher behandeln zu können, wurden für den praktischen Teil dieser Diplomarbeit *einige Szenarien* entwickelt. Dazu werden grundsätzlich drei verschiedene Produktvarianten (A, B, C) in den einzelnen Prozessschritten betrachtet. Jeweils wird die entsprechende Variante in den zugehörigen Bearbeitungsprozessen einer Wertschöpfung unterzogen.

Bei allen Szenarien werden zwei nacheinander folgende Prozesse beobachtet und es wird hier das FIFO-Prinzip vorausgesetzt. Der Zustand des nachfolgenden Bearbeitungsprozesses wird mit einem Strich beschrieben, z. B. A und A` bilden eine derartige Entwicklung des Produktes.

6.1 Szenario 1

Es gibt drei Varianten von den Produkten, nämlich A, B und C.

Unter "1. Produktion" ist der erste Prozess und unter "2. Produktion" ist der zweite, aufeinanderfolgende Prozess zu verstehen. Der erste Prozess hat ein Produktionsziel. Bei diesem Szenario beginnt der zweite Prozess einer Variante erst dann mit dem Produzieren, nachdem der erste Prozess dieser Variante das Produktionsziel erreicht hat. (dh. B wird erst dann produziert, wenn die Produktion von A fertig ist und C wird erst dann produziert, wenn die Produktion von A und B fertig sind. A` beginnt erst mit dem Produzieren, wenn A sein Produktionsziel erreicht hat. B` beginnt erst mit dem Produzieren, wenn A, A` und B mit dem Produzieren fertig sind. C` beginnt mit dem Produzieren, wenn A, A`, B, B` und C mit dem Produzieren fertig sind.) Die Produktionsreihenfolge lautet: A - B - C .

- a) Bei beiden Prozesse sind in Summe die Losgrößen gleich

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	2
B	4
C	6
2. Produktion	
A'	6
B'	2
C'	4

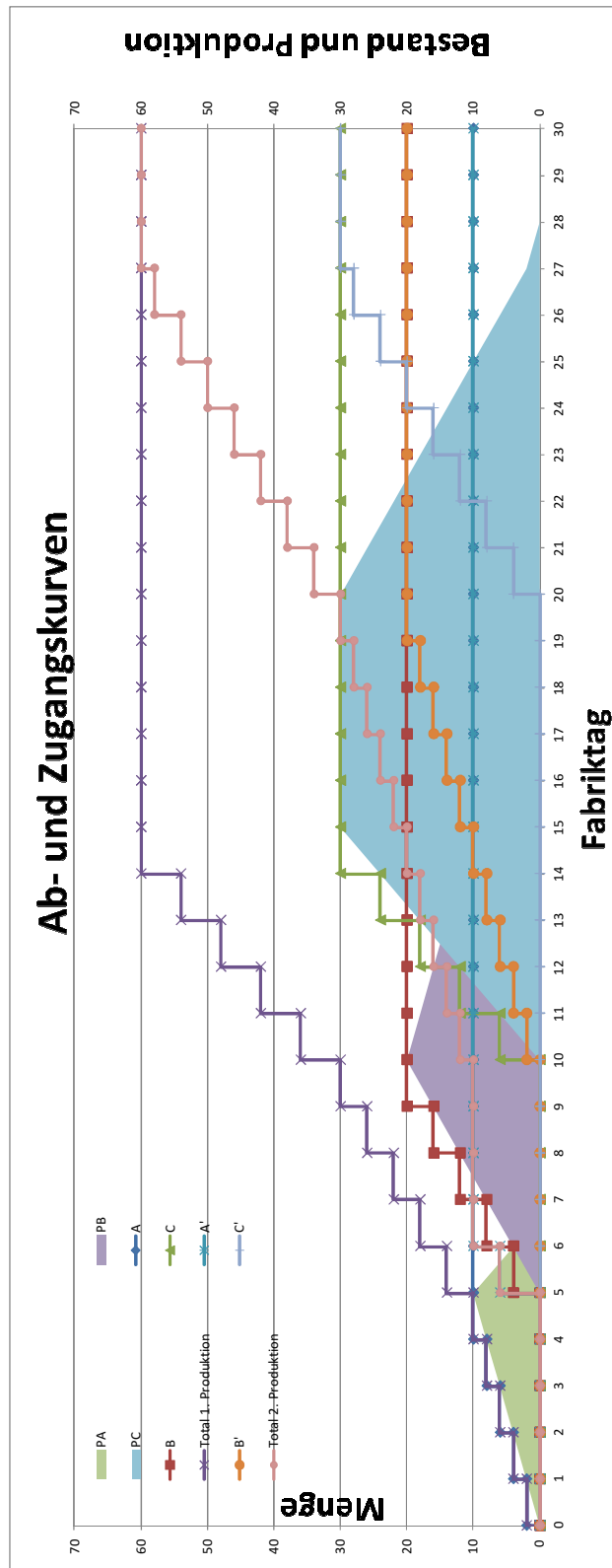


Abbildung 58: Szenario 1 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

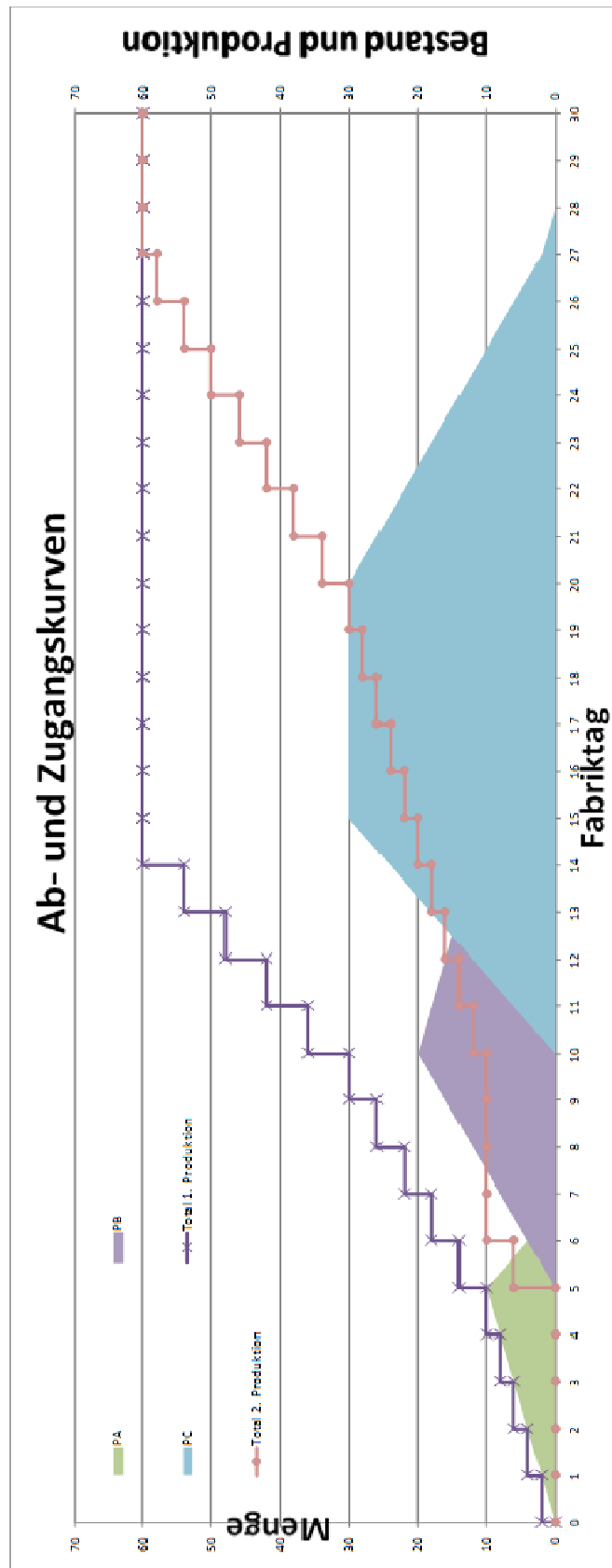


Abbildung 59: Szenario 1 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

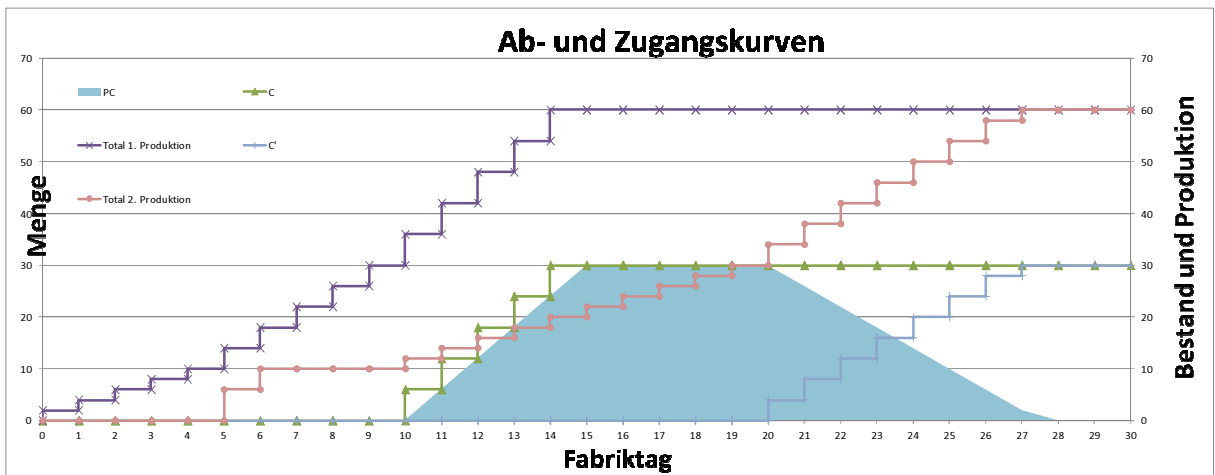
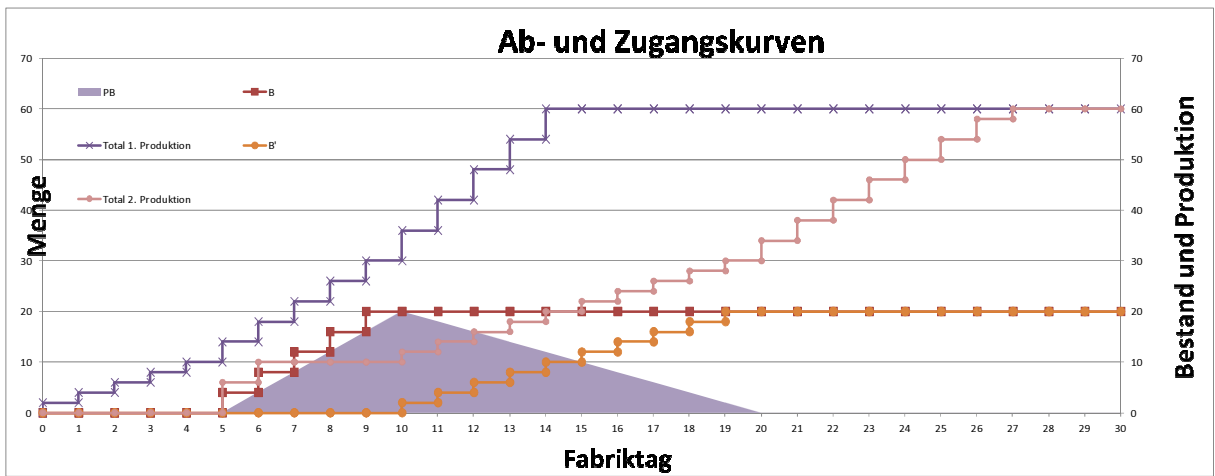
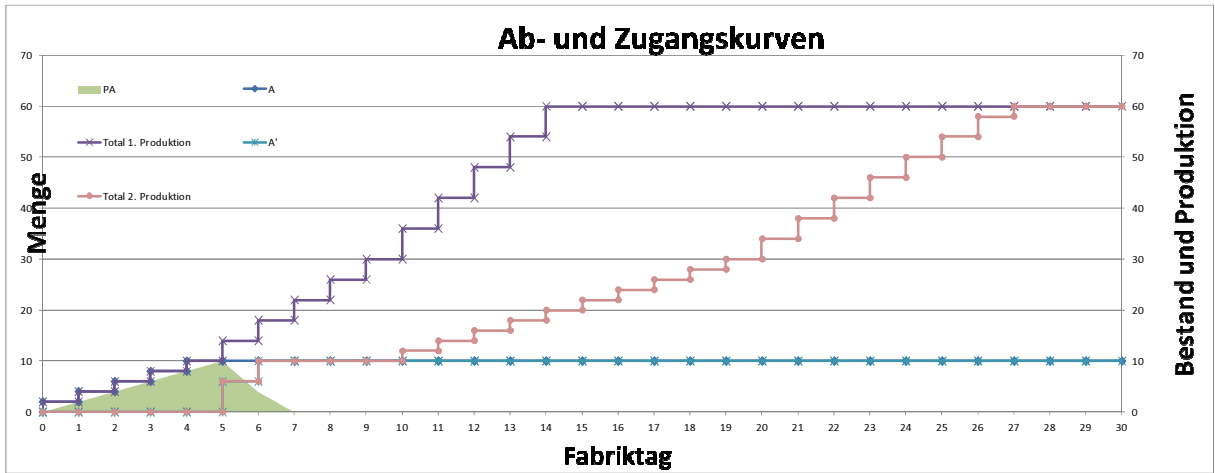


Abbildung 60: Szenario 1 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

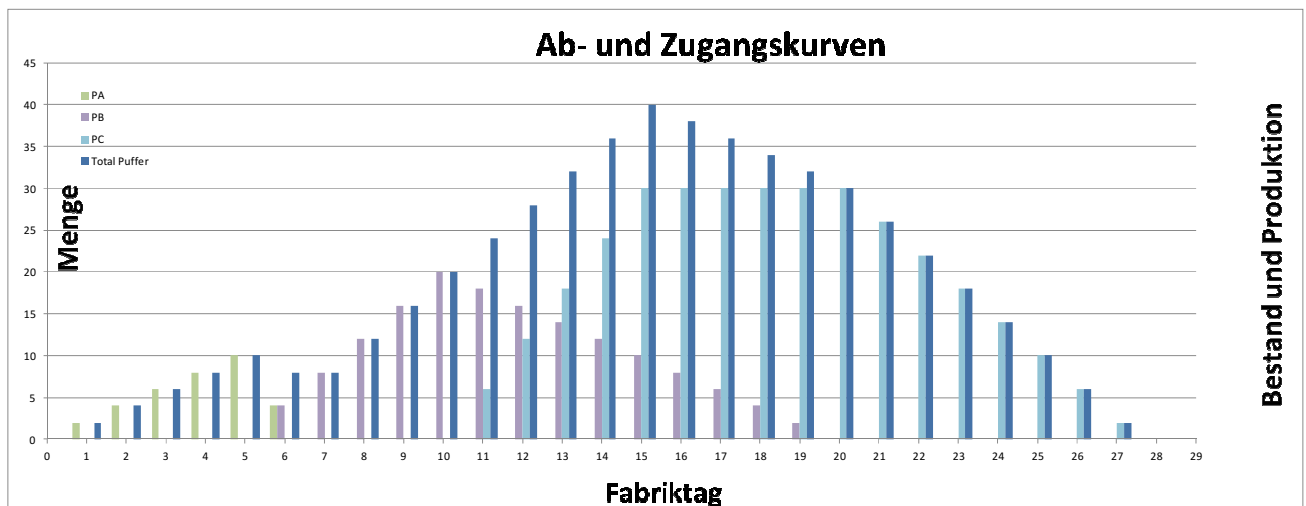


Abbildung 61: Szenario 1 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Die Summe der Losgrößen der einzelnen Produktionsschritte ist gleich groß, jedoch kommt es in diesem Beispiel zu verschiedenen Losgrößen je Variante. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. Zur besseren Übersicht wurden die in Abbildung 59 gemeinsam dargestellten Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen in den darauffolgenden Graphiken getrennt dargestellt. Die Abbildung 61 illustriert zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Bestände in den Puffern. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

b) Losgröße bei Prozess 1 ist größer als Losgröße bei Prozess 2

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im ersten Produktionsschritt doppelt so groß wie im darauffolgenden.

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	4
B	8
C	12
2. Produktion	
A'	2
B'	4
C'	6

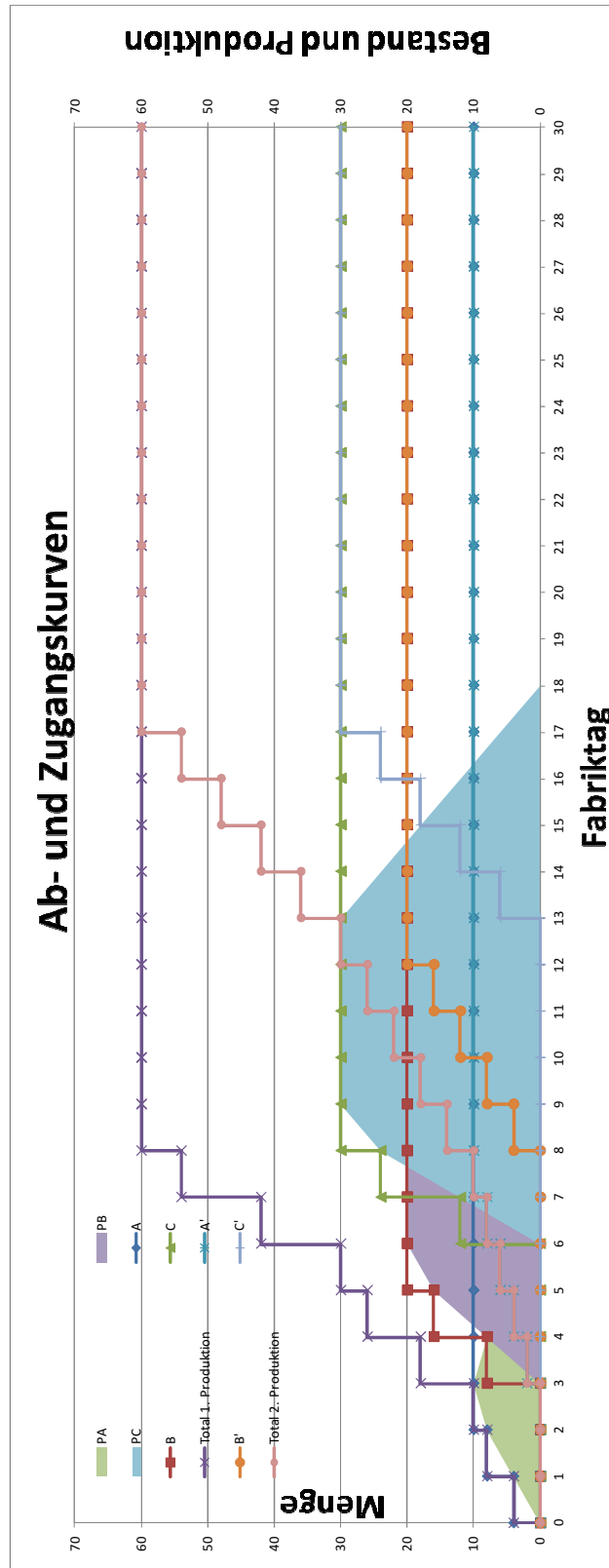


Abbildung 62: Szenario 1 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

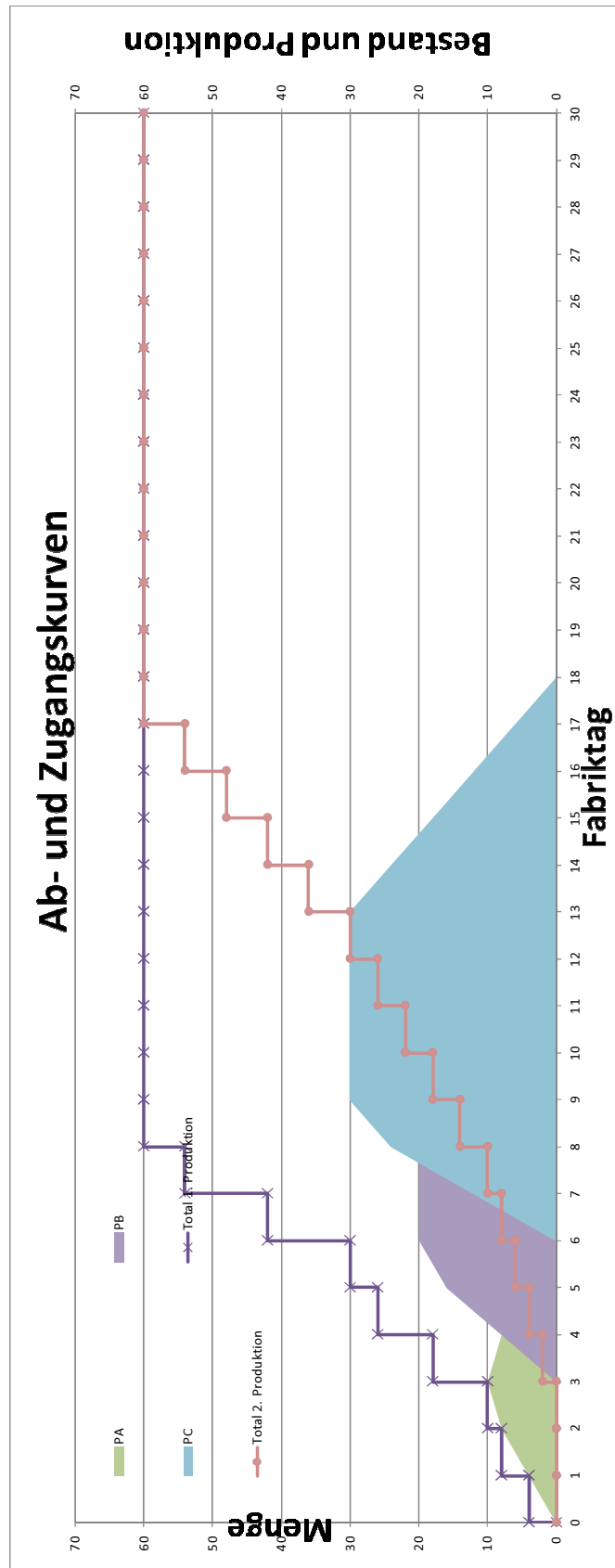


Abbildung 63: Szenario 1 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

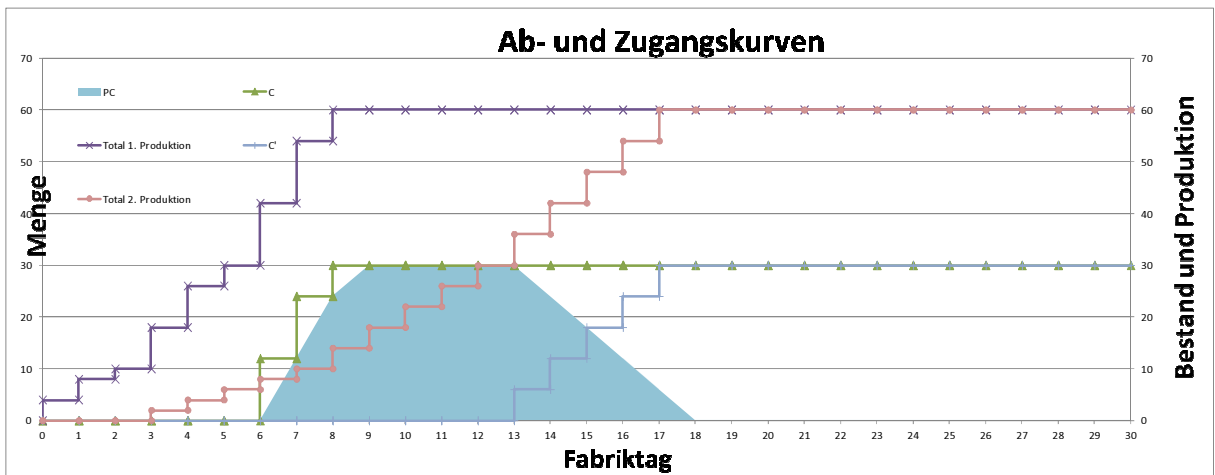
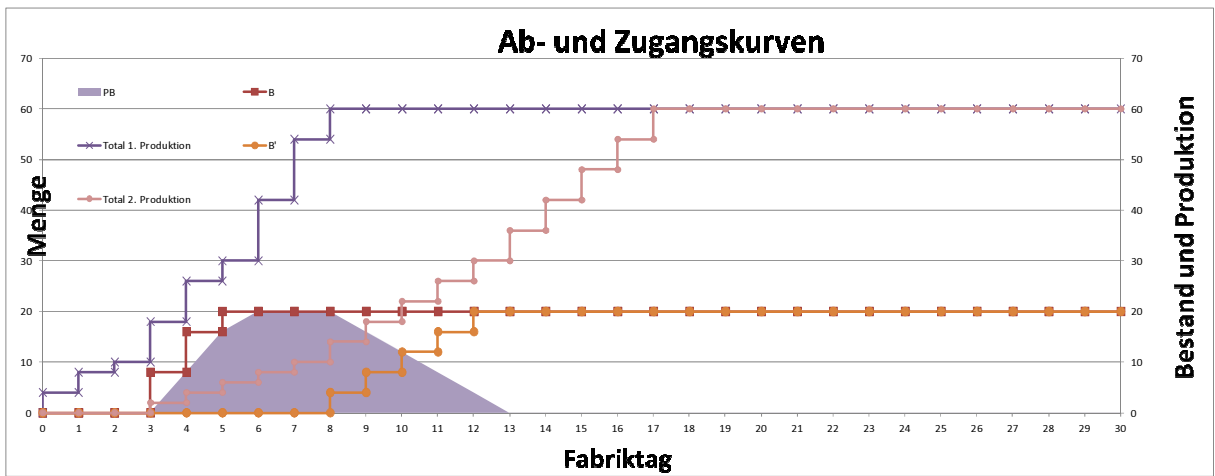
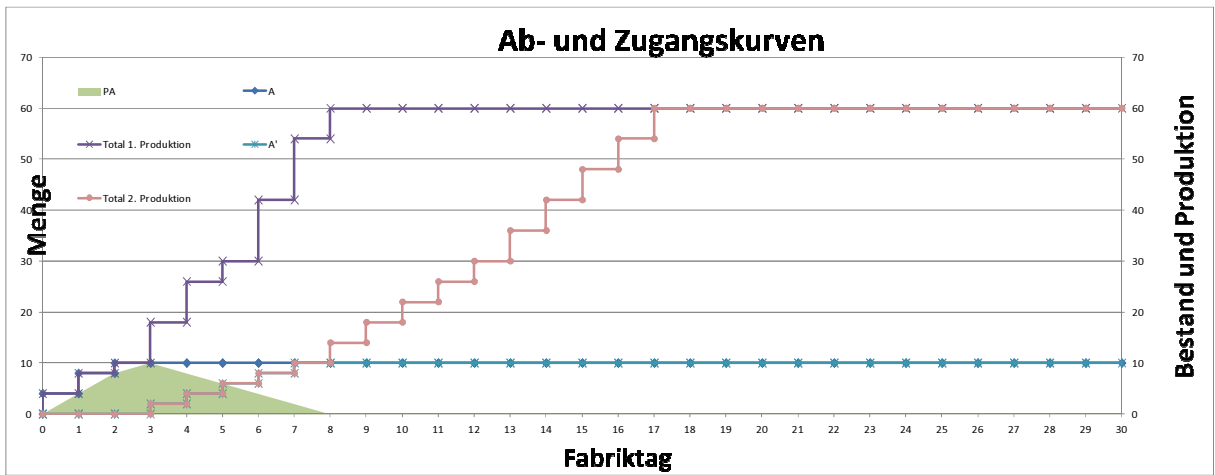


Abbildung 64: Szenario 1 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

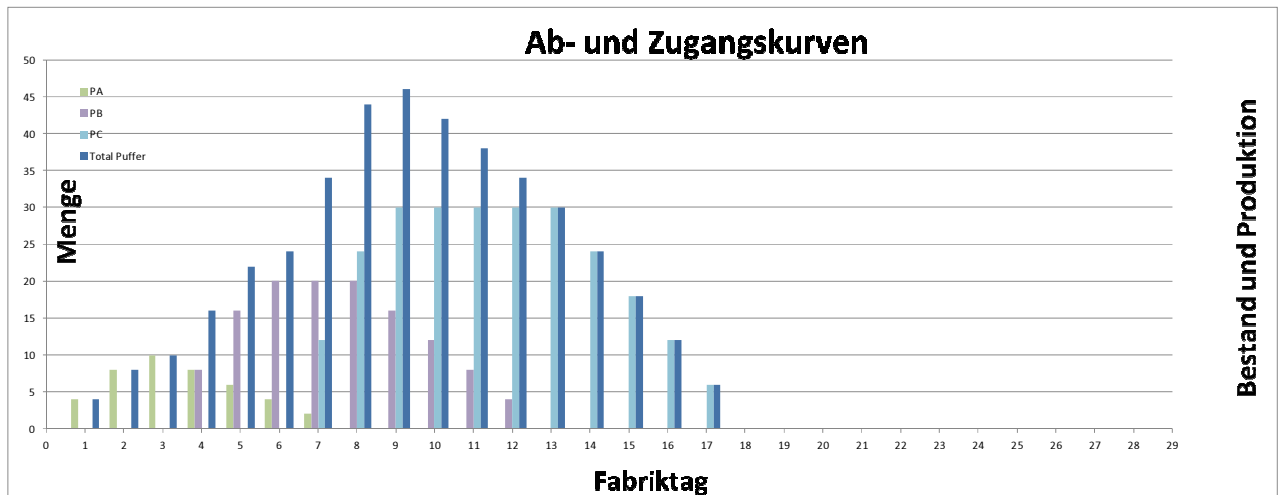


Abbildung 65: Szenario 1 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im ersten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Darauffolgenden. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. Zur besseren Übersicht wurden die in Abbildung 63 gemeinsam dargestellten Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen in den darauffolgenden Graphiken getrennt dargestellt. Die Abbildung 65 illustriert zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Bestände in den Puffern. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

c) Losgröße bei Prozess 2 ist größer als Losgröße bei Prozess 1

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im zweiten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Ersten.

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	2
B	4
C	6
2. Produktion	
A'	4
B'	8
C'	12

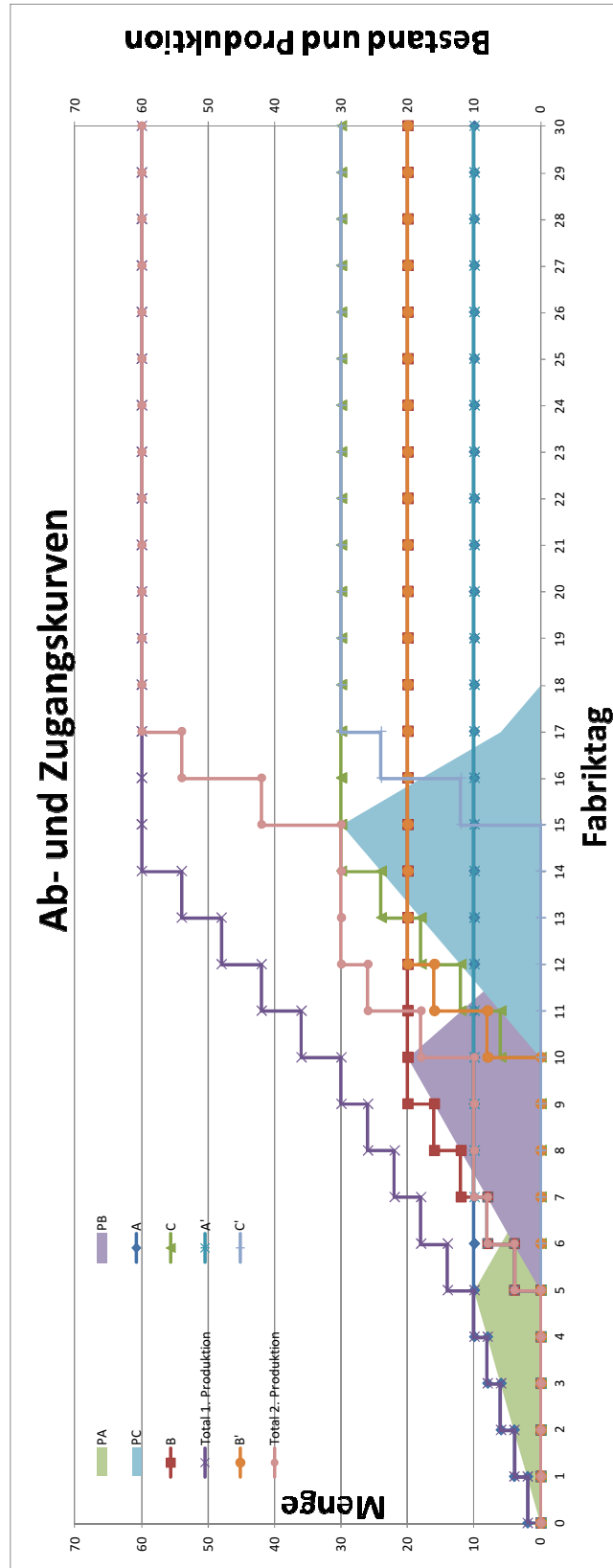


Abbildung 66: Szenario 1 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

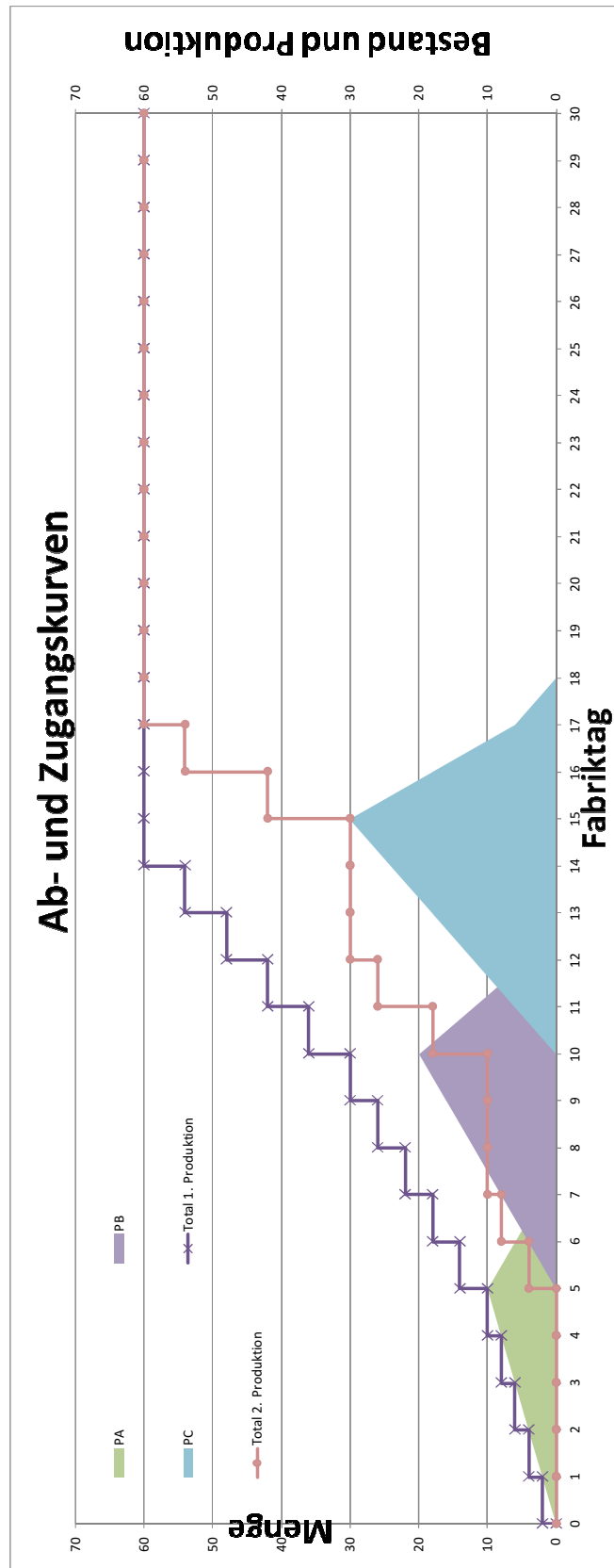


Abbildung 67: Szenario 1 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

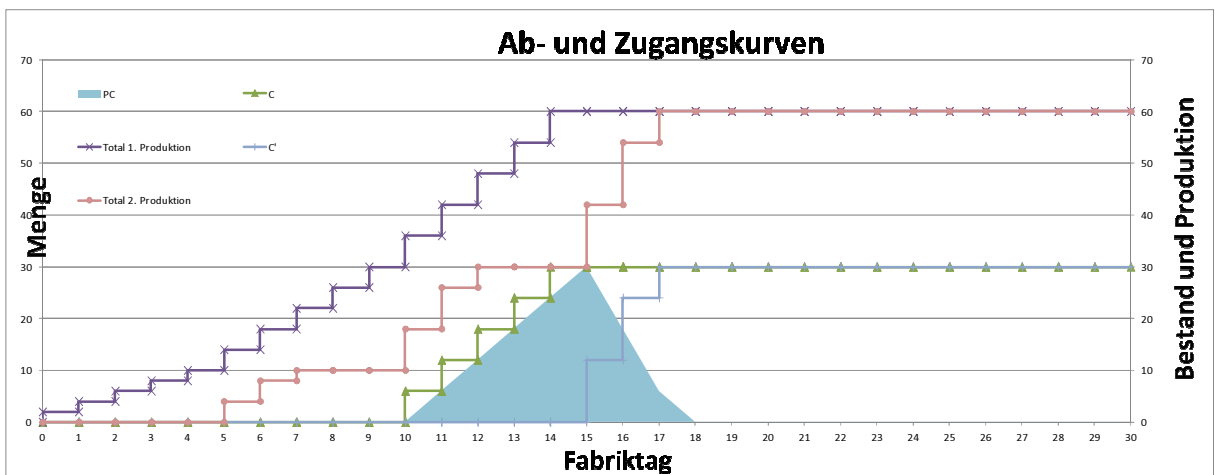
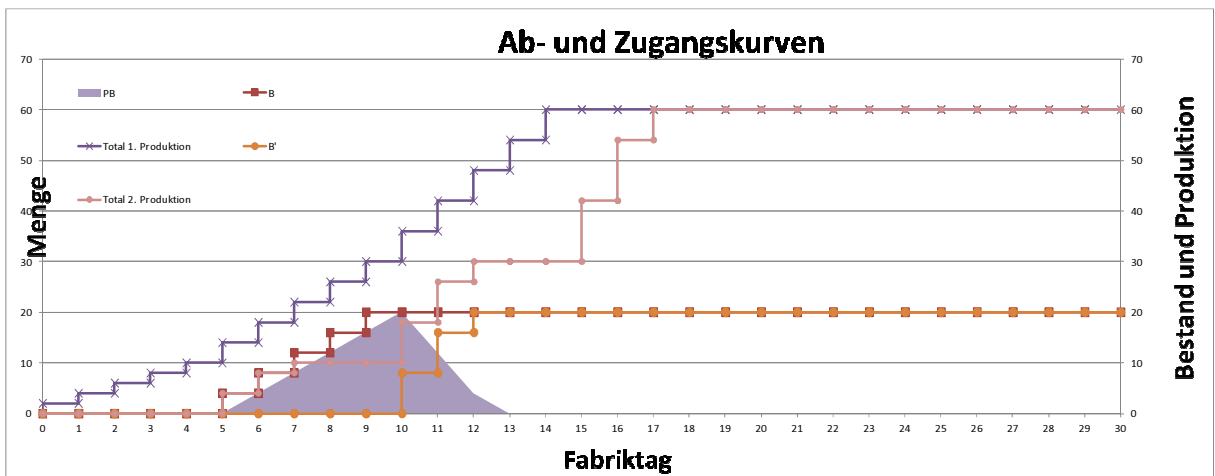
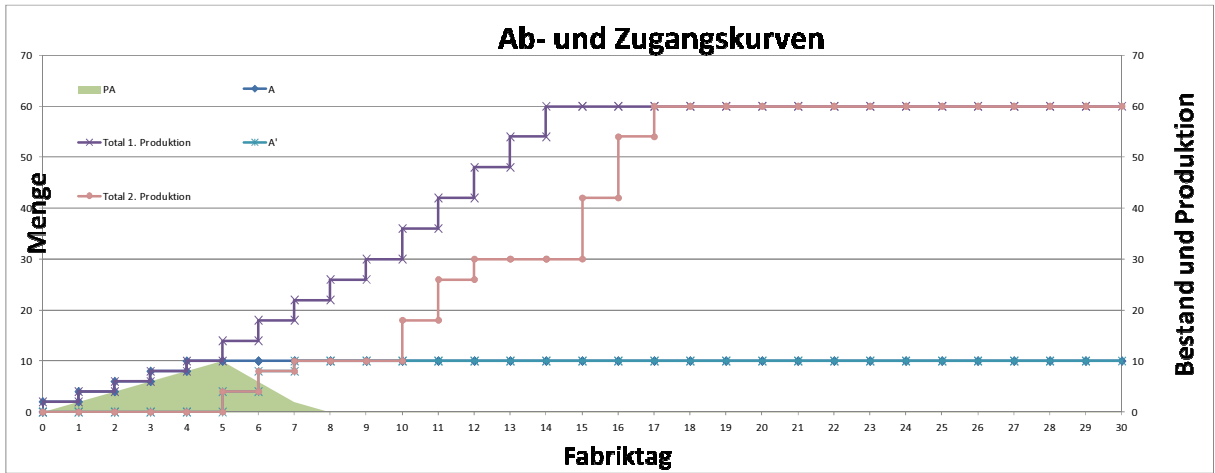


Abbildung 68: Szenario 1 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

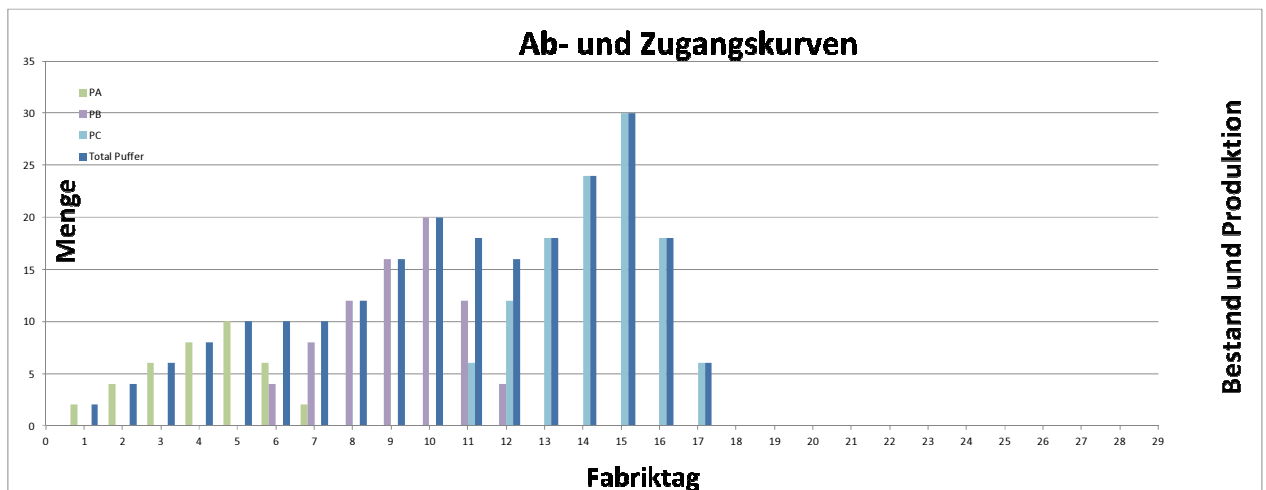


Abbildung 69: Szenario 1 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im zweiten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Ersten. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. Zur besseren Übersicht wurden die in Abbildung 67 gemeinsam dargestellten Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen in den darauffolgenden Graphiken getrennt dargestellt. Die Abbildung 69 illustriert zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Bestände in den Puffern. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

6.1.1 Ausblick Szenario 1

Aus den vorangegangenen Abbildungen ist ersichtlich, dass die Diagramme am wenigsten Bestand aufweisen, bei denen die Losgröße von Prozess 2 größer als die von Prozess 1 sind. So wird daraus diese Aussage abgeleitet:

Wenn man bei Szenario 1 am Prozess 2 Losgrößen produziert, die größer sind als bei Prozess 1, dann wird sich weniger Bestand zwischen den Prozessen bilden, was wünschenswerter für die Produktion ist.

6.2 Szenario 2

Es gibt drei Varianten von den Produkten, nämlich A, B und C.

Unter "1. Produktion" ist der erste Prozess und unter "2. Produktion" ist der zweite, aufeinanderfolgende Prozess zu verstehen. Der erste Prozess hat ein Produktionsziel. Bei dieser Szenario beginnt der zweite Prozess einer Variante mit dem Produzieren, ohne zu warten, dass der erste Prozess dieser Variante dieses Produktionsziel erreicht hat. (d.h. A` beginnt zu produzieren, ohne darauf zu warten, dass A sein Produktionsziel erreicht. Wenn A sein Produktionsziel erreicht und B mit dem Produzieren beginnt und aber A` sein Produktionsziel noch nicht erreicht hat, darf trotzdem B` mit dem Produzieren beginnen, ohne auf A´ zu warten.) Die Produktionsreihenfolge lautet: A - B - C .

- a) Bei beiden Prozesse sind in Summe die Losgrößen gleich

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	2
B	4
C	6
2. Produktion	
A'	6
B'	2
C'	4

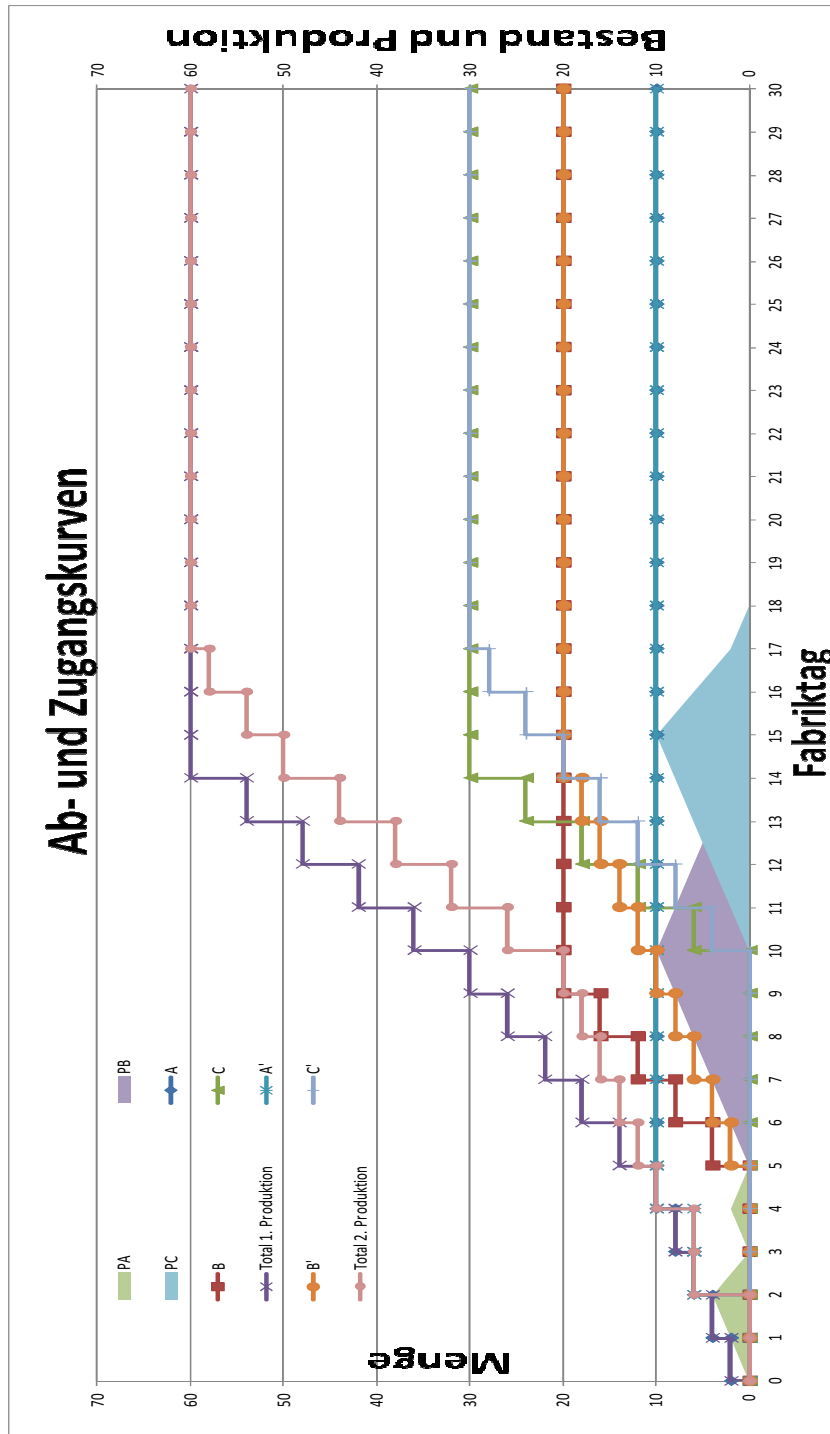


Abbildung 70: Szenario 2 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

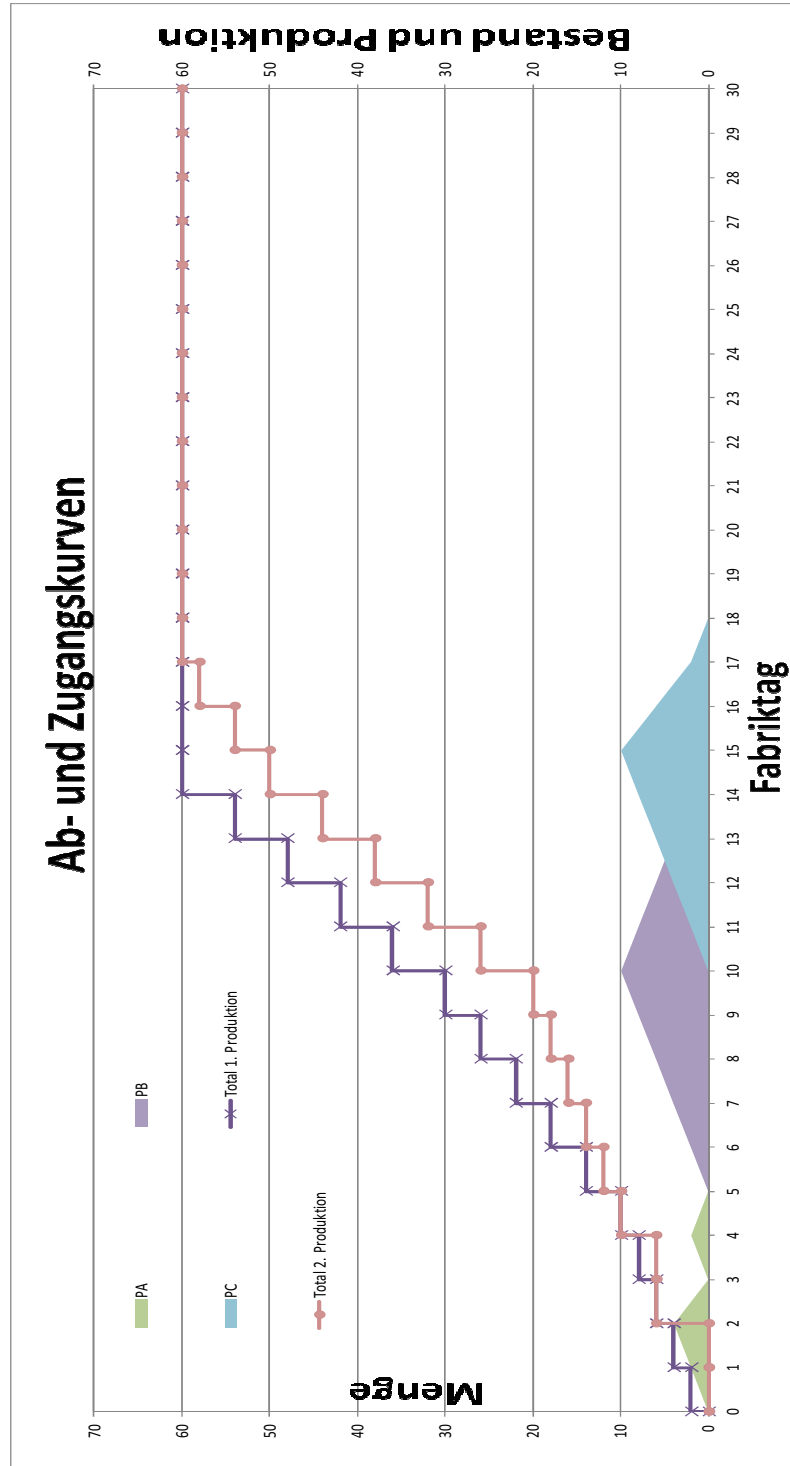


Abbildung 71: Szenario 2 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

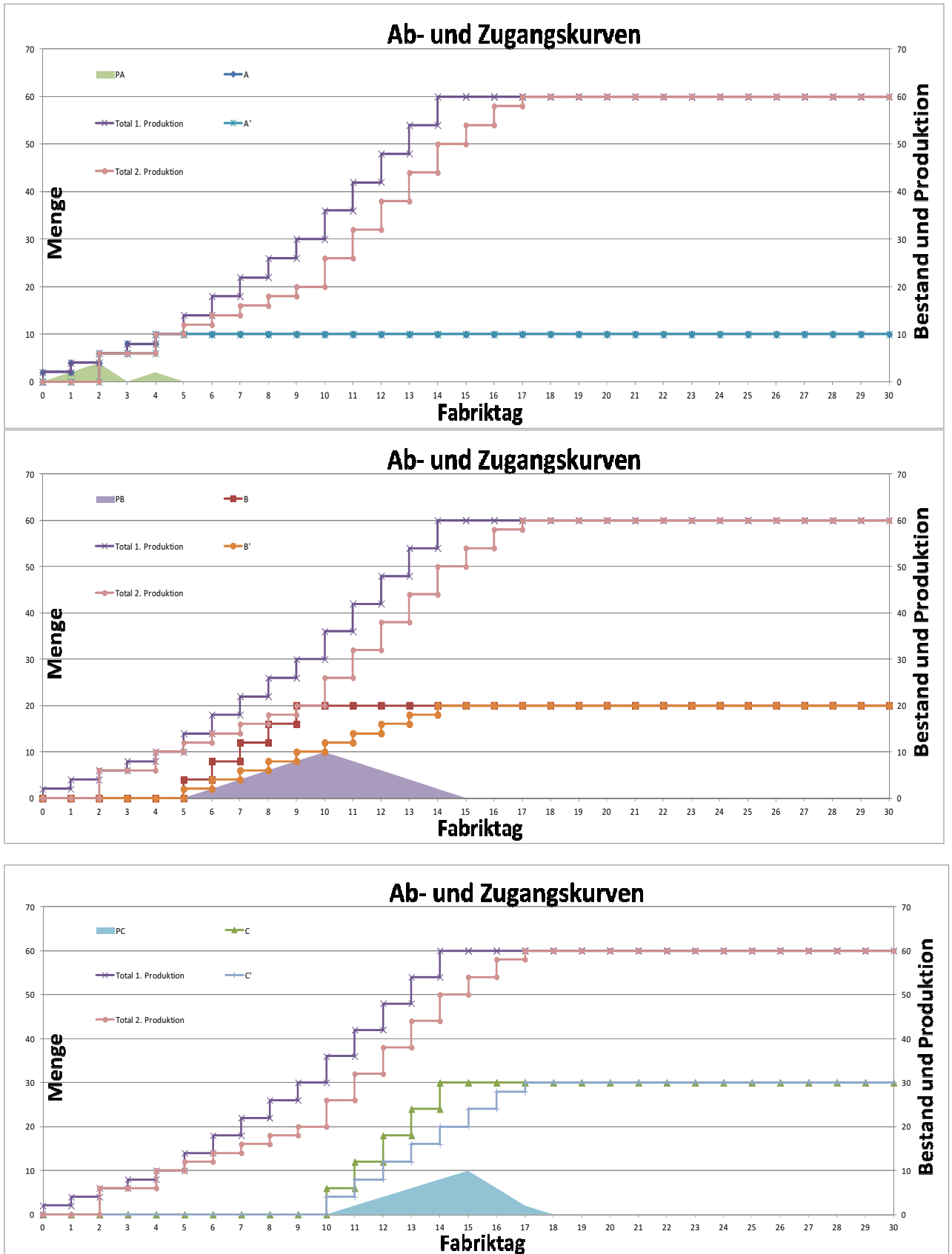


Abbildung 72: Szenario 2 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

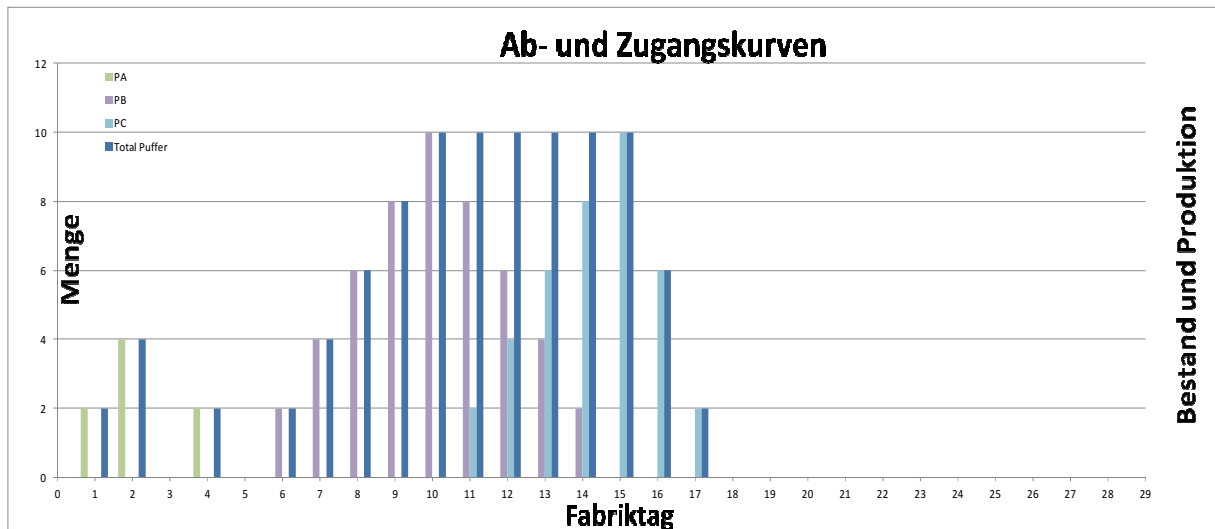


Abbildung 73: Szenario 2 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Die Summe der Losgrößen der einzelnen Produktionsschritte ist gleich groß, jedoch kommt es in diesem Beispiel zu verschiedenen Losgrößen je Variante. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. Zur besseren Übersicht wurden die in Abbildung 71 gemeinsam dargestellten Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen in den darauffolgenden Graphiken getrennt dargestellt. Die Abbildung 73 illustriert zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Bestände in den Puffern. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

b) Losgröße bei Prozess 1 ist größer als Losgröße bei Prozess 2

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im ersten Produktionsschritt doppelt so groß wie im darauffolgenden.

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	4
B	8
C	12
2. Produktion	
A'	2
B'	4
C'	6

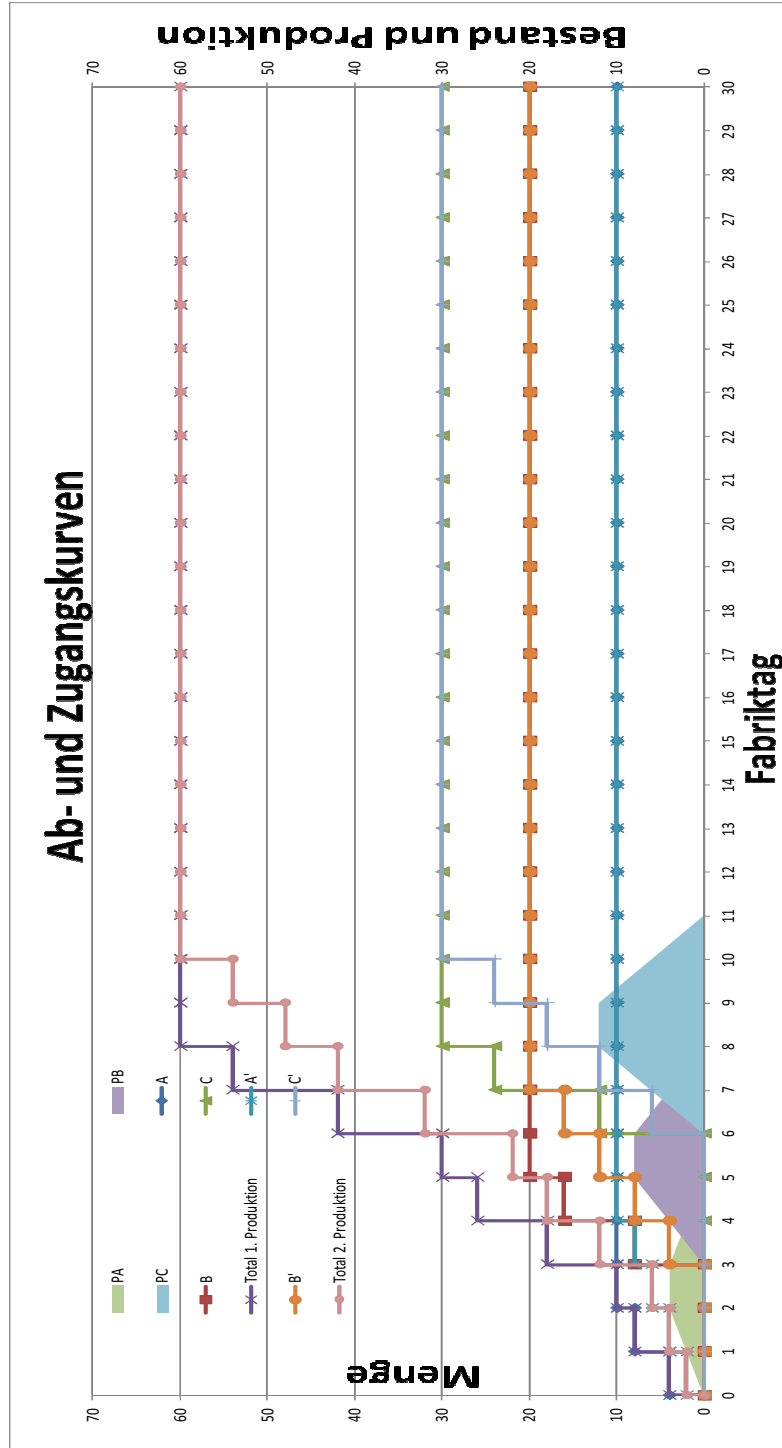


Abbildung 74: Szenario 2 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

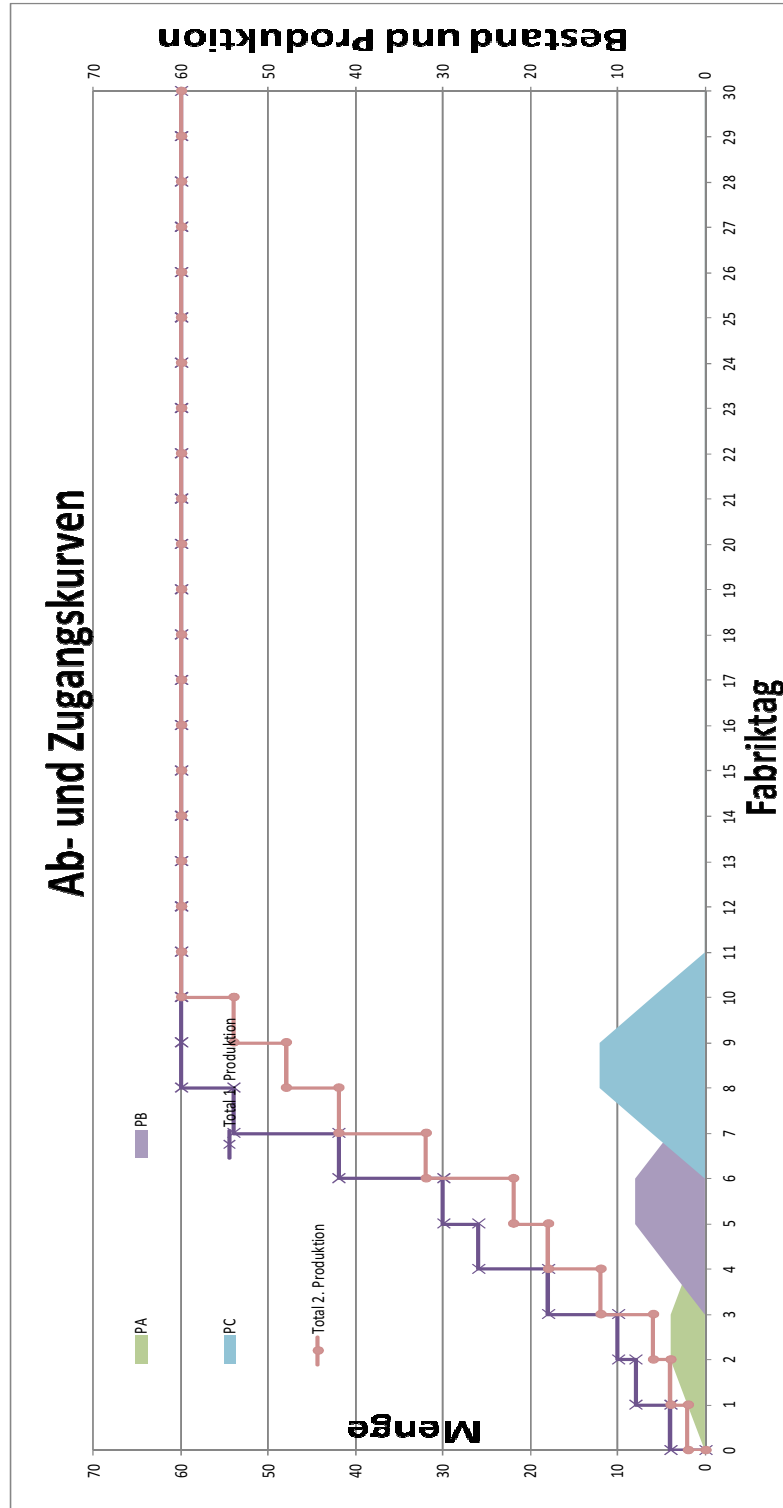


Abbildung 75: Szenario 2 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

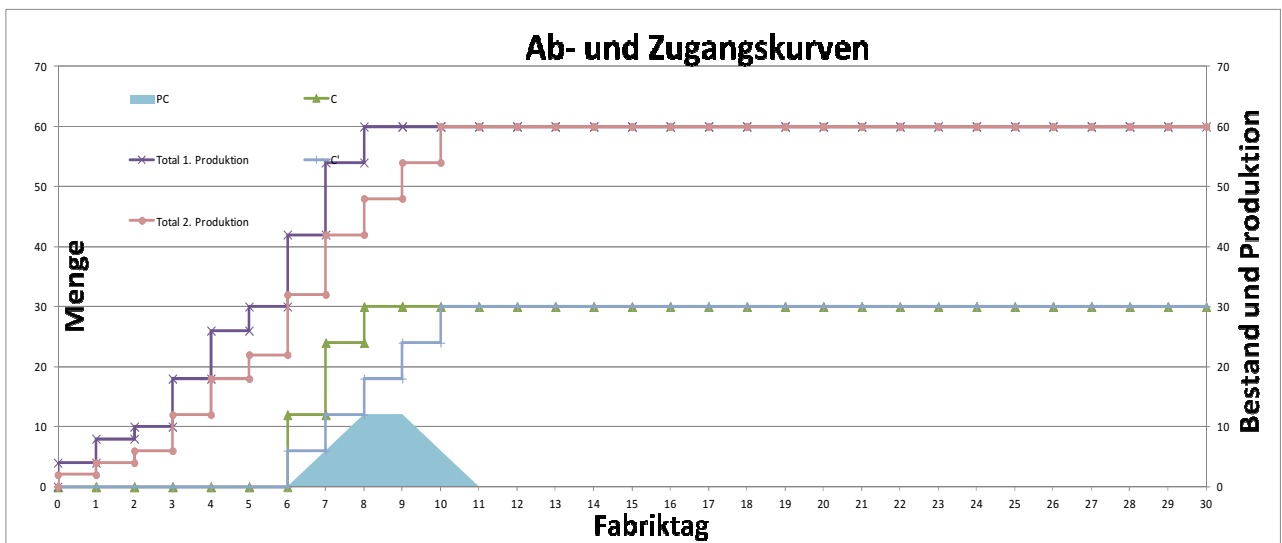
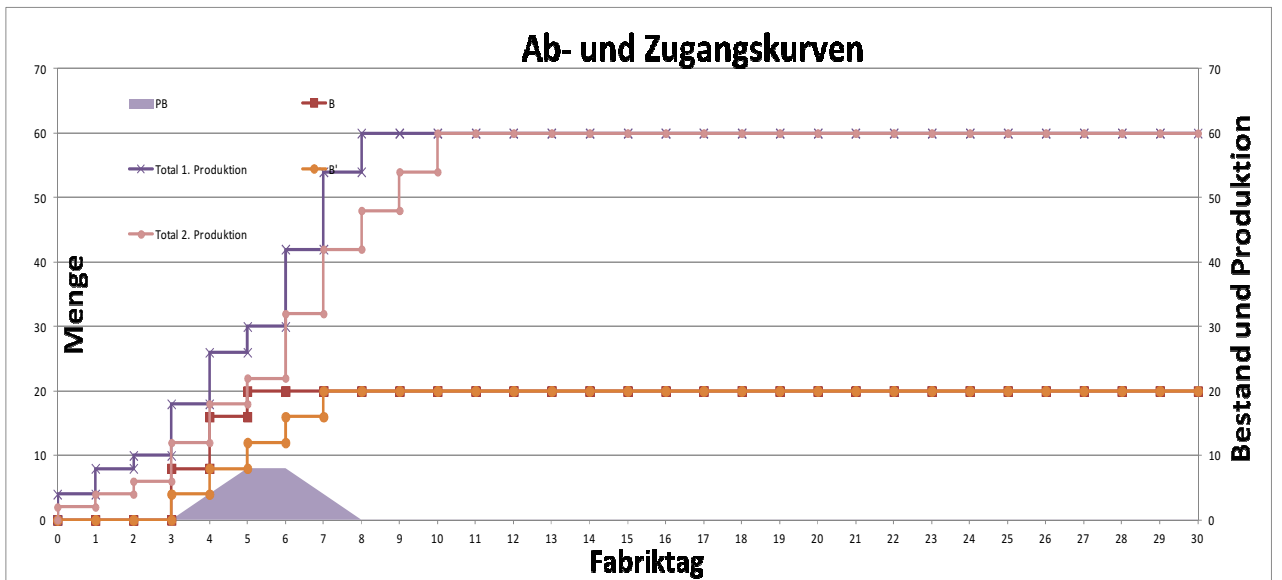
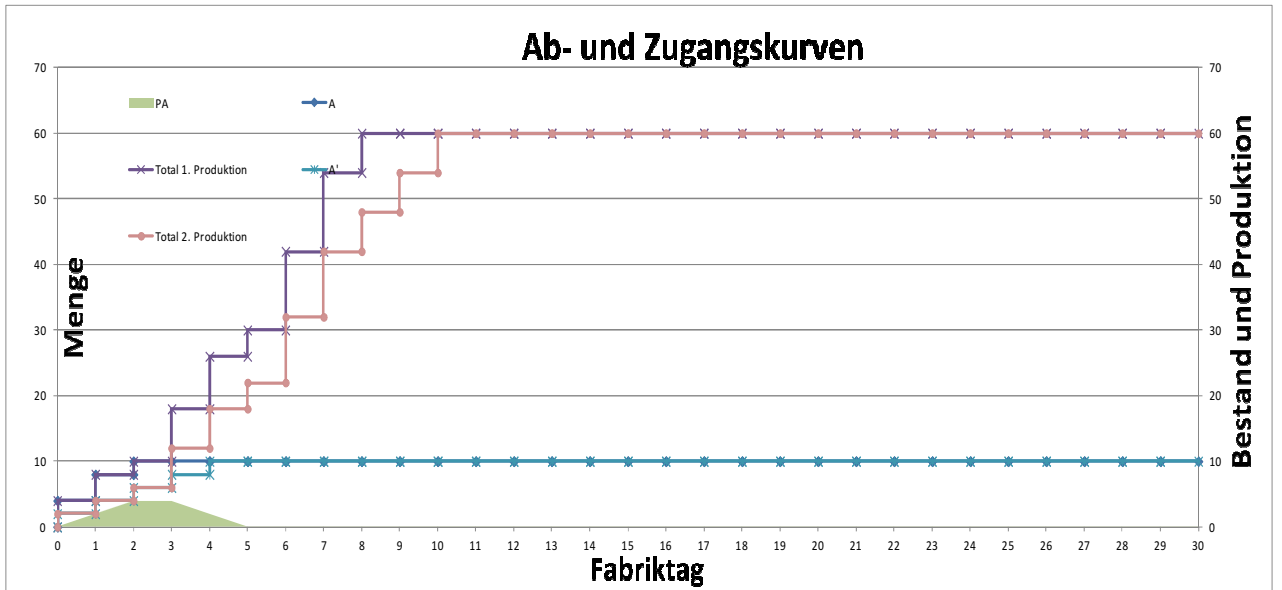


Abbildung 76: Szenario 2 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

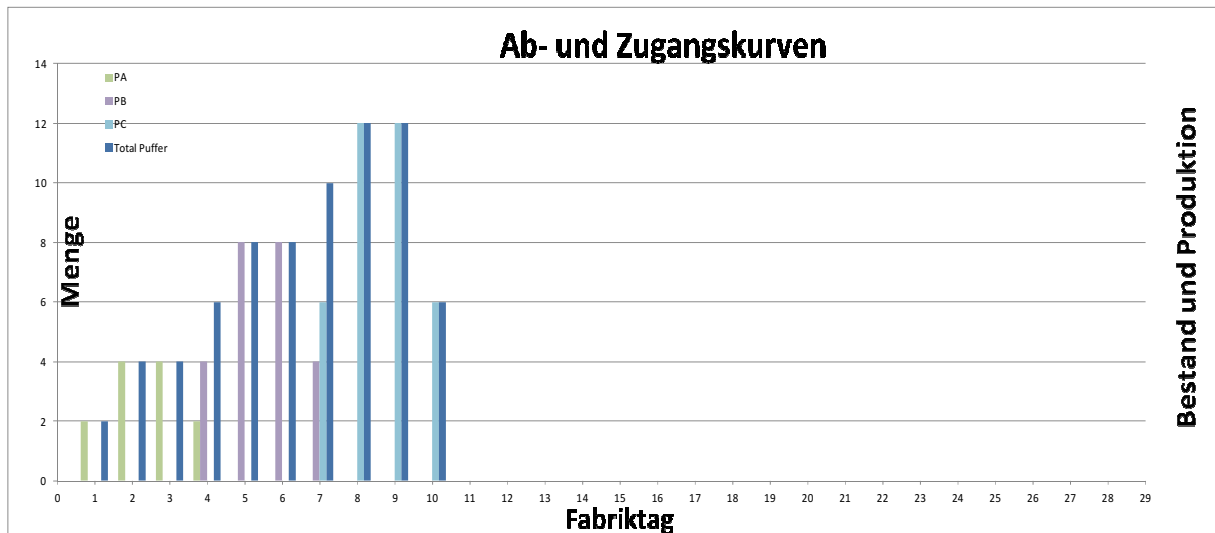


Abbildung 77: Szenario 2 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im ersten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Darauffolgenden. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. Zur besseren Übersicht wurden die in Abbildung 75 gemeinsam dargestellten Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen in den darauffolgenden Graphiken getrennt dargestellt. Die Abbildung 77 illustriert zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Bestände in den Puffern. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

c) Losgröße bei Prozess 2 ist größer als Losgröße bei Prozess 1

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im zweiten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Ersten.

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	2
B	4
C	6
2. Produktion	
A'	4
B'	8
C'	12

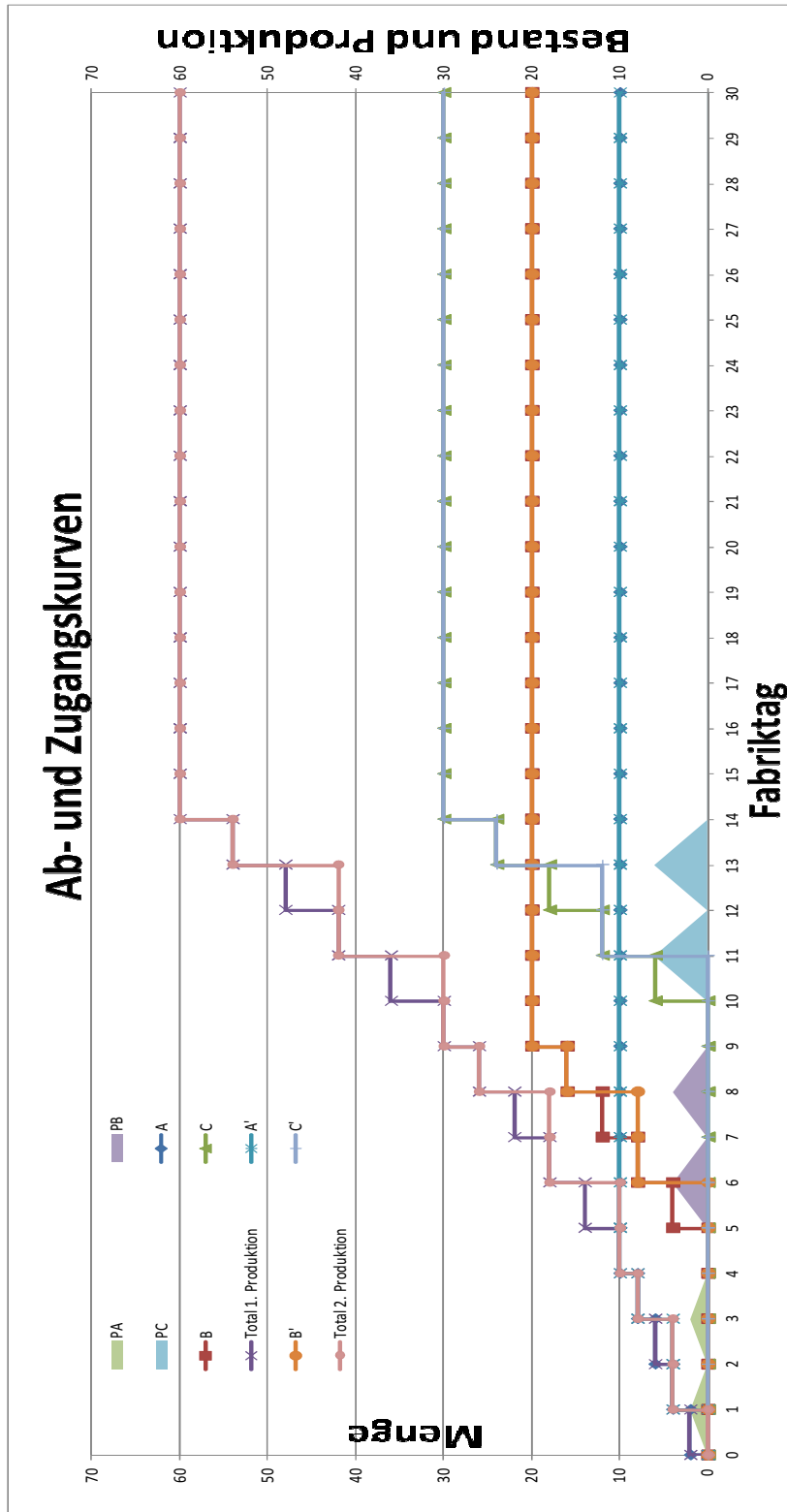


Abbildung 78: Szenario 2 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

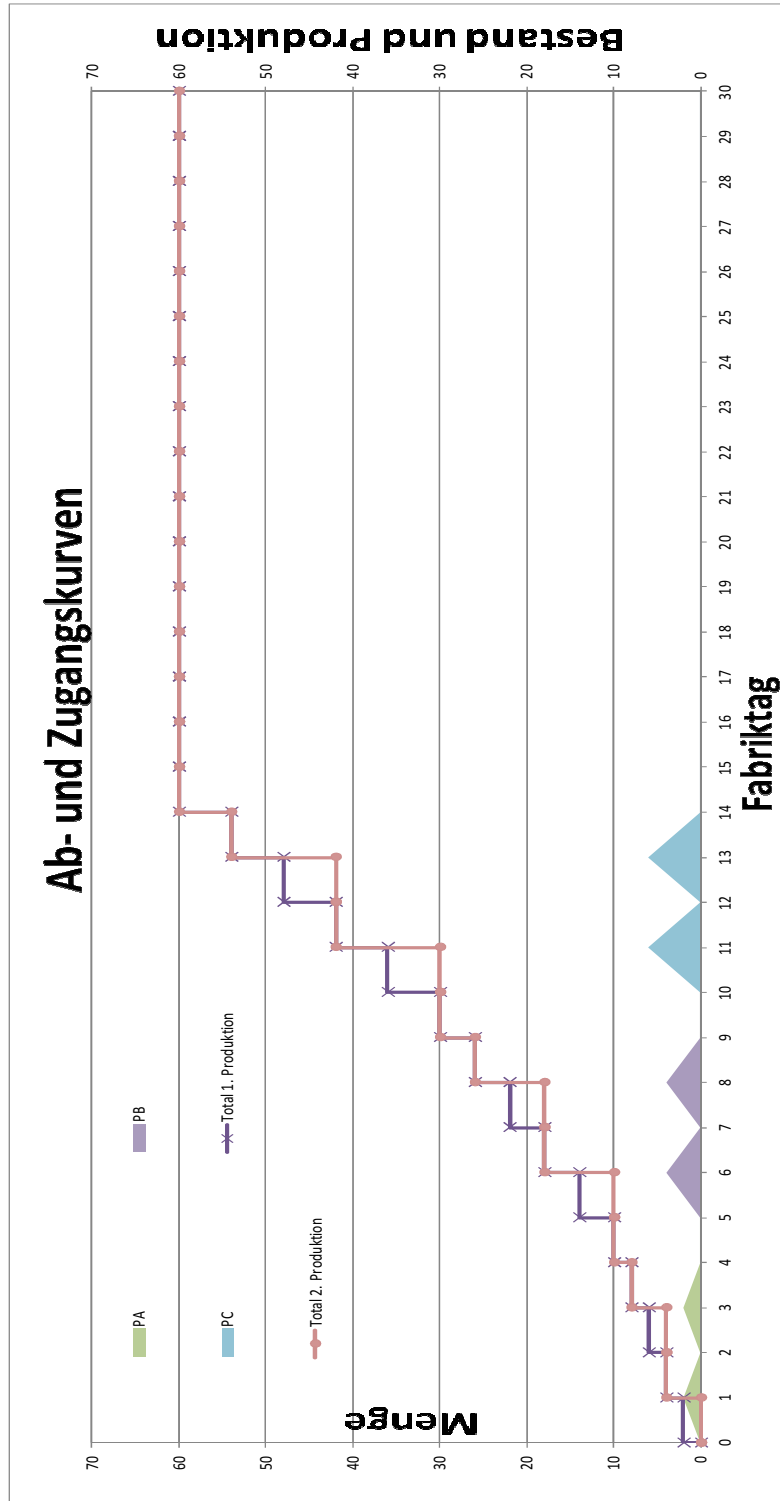


Abbildung 79: Szenario 2 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

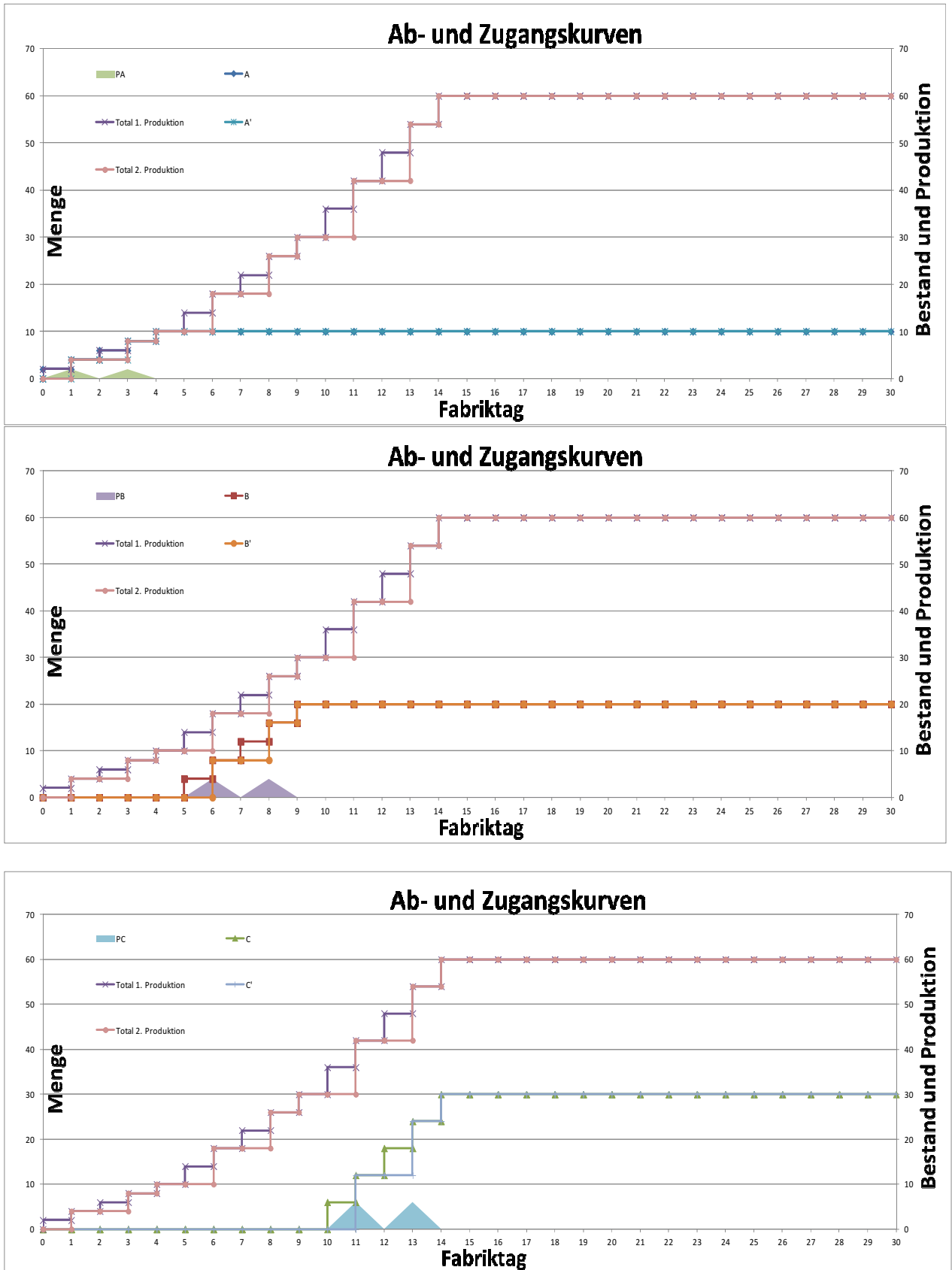


Abbildung 80: Szenario 2 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

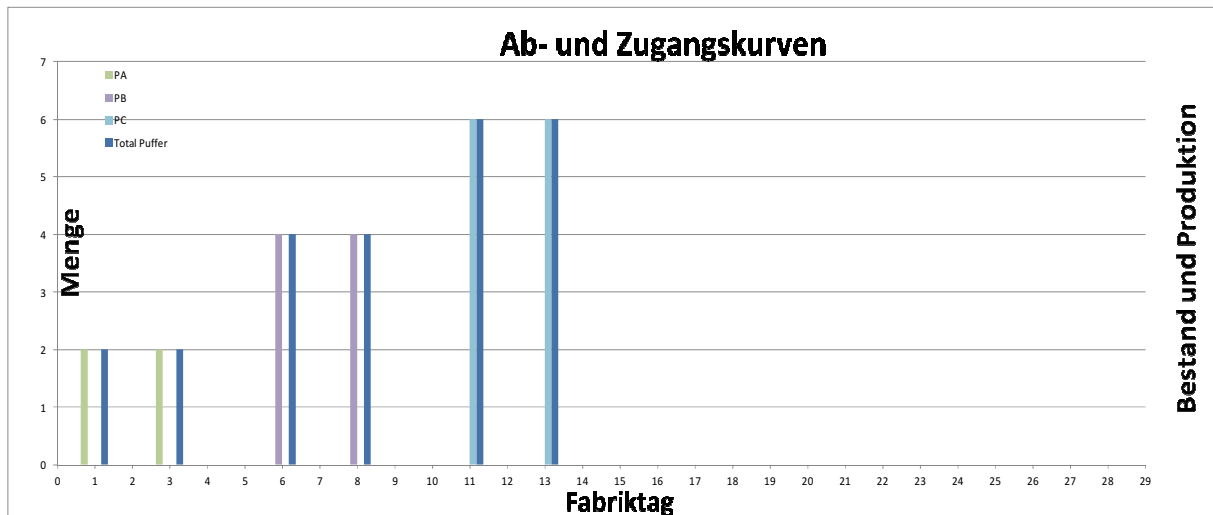


Abbildung 81: Szenario 2 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im zweiten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Ersten. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. Zur besseren Übersicht wurden die in Abbildung 79 gemeinsam dargestellten Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen in den darauffolgenden Graphiken getrennt dargestellt. Die Abbildung 81 illustriert zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Bestände in den Puffern. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

6.2.1 Ausblick Szenario 2

Aus den vorangegangenen Abbildungen ist ersichtlich, dass die Diagramme am wenigsten Bestand aufweisen, bei denen die Losgröße von Prozess 2 größer als die von Prozess 1 sind. So wird daraus diese Aussage abgeleitet:

Wenn man bei Szenario 2 am Prozess 2 Losgrößen produziert, die größer sind als bei Prozess 1, dann wird sich weniger Bestand zwischen den Prozessen bilden, was wünschenswerter für die Produktion ist.

6.3 Szenario 3

Es gibt drei Varianten von den Produkten, nämlich A, B und C.

Unter "1. Produktion" ist der erste Prozess und unter "2. Produktion" ist der zweite, nacheinanderfolgende Prozess zu verstehen. Der erste Prozess hat ein Produktionsziel. Bei dieser Szenario beginnt der zweite Prozess einer Variante erst dann mit dem Produzieren, nachdem der erste Prozess dieser Variante dieses Produktionsziel erreicht hat. (dh. A` beginnt erst mit dem Produzieren, wenn A sein Produktionsziel erreicht hat. Der einzige Unterschied vom Szenario 1 ist es, dass B` nur darauf wartet, dass B sein Produktionsziel erreicht aber B` wartet nicht darauf, dass A` fertig produziert hat.) Die Produktionsreihenfolge lautet: A - B - C .

Um es zu ermöglichen, dass die Varianten unabhängig weiter produziert zu werden können, wird eine uneingeschränkte Verfügbarkeit von Produktionsanlagen angenommen.

- a) Bei beiden Prozesse sind in Summe die Losgrößen gleich

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	2
B	4
C	6
2. Produktion	
A'	6
B'	2
C'	4

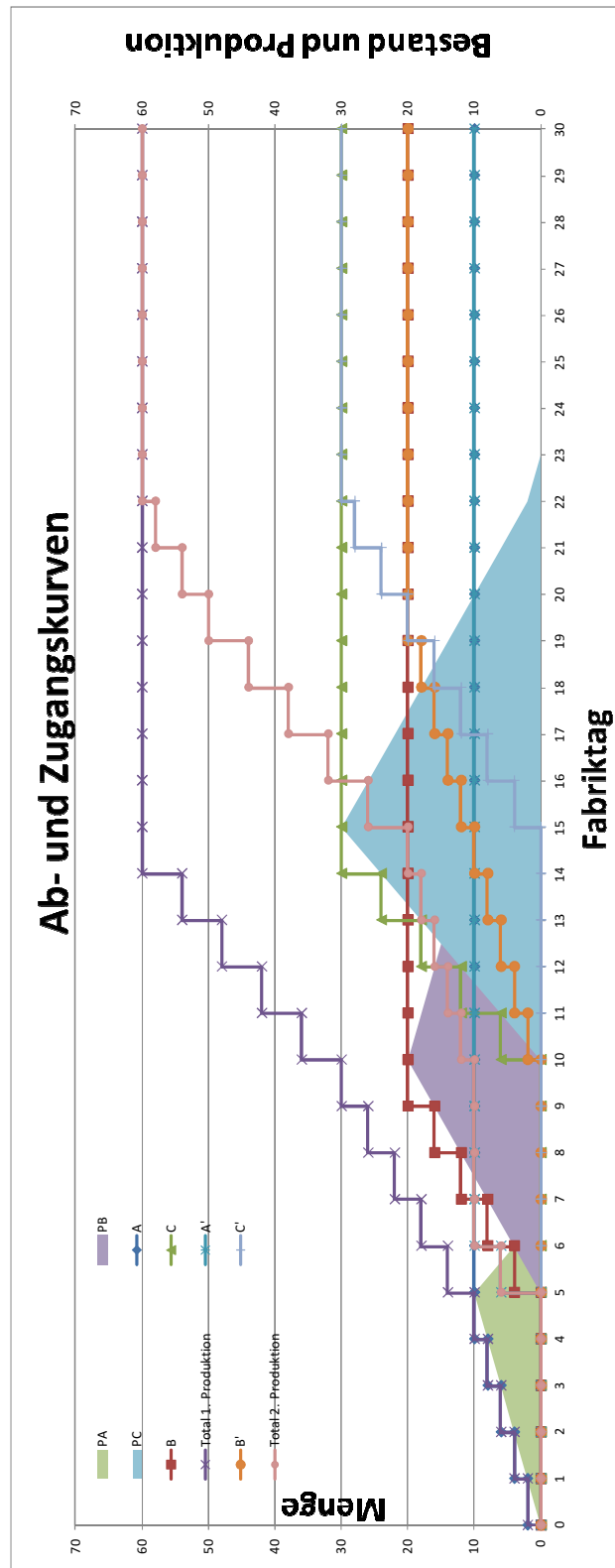


Abbildung 82: Szenario 3 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

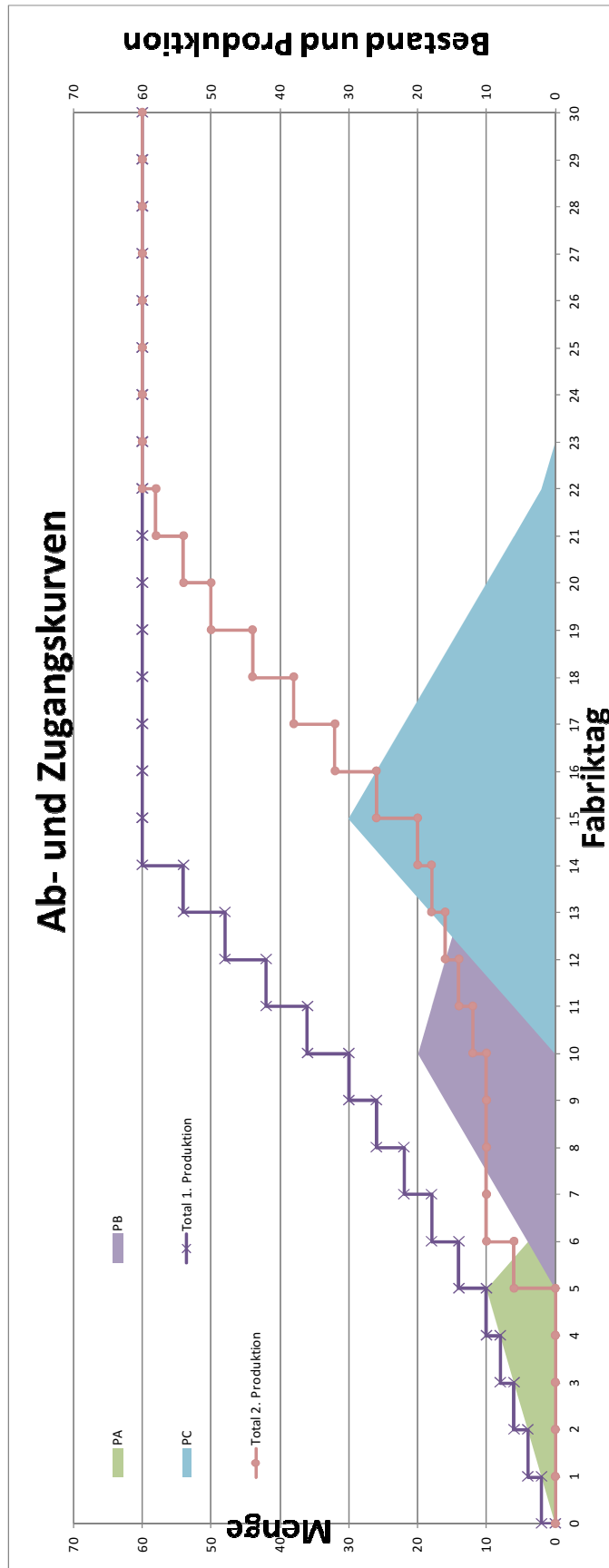


Abbildung 83: Szenario 3 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

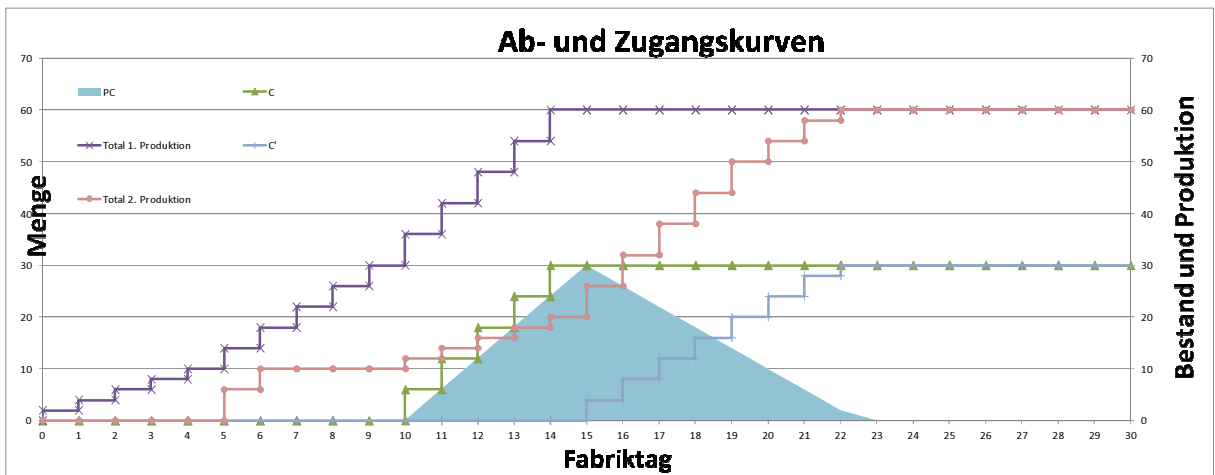
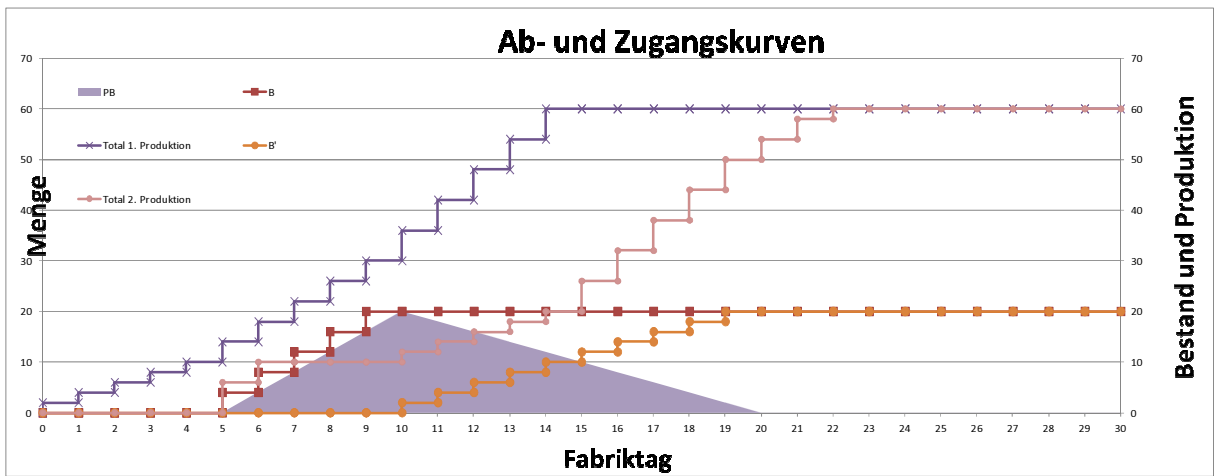
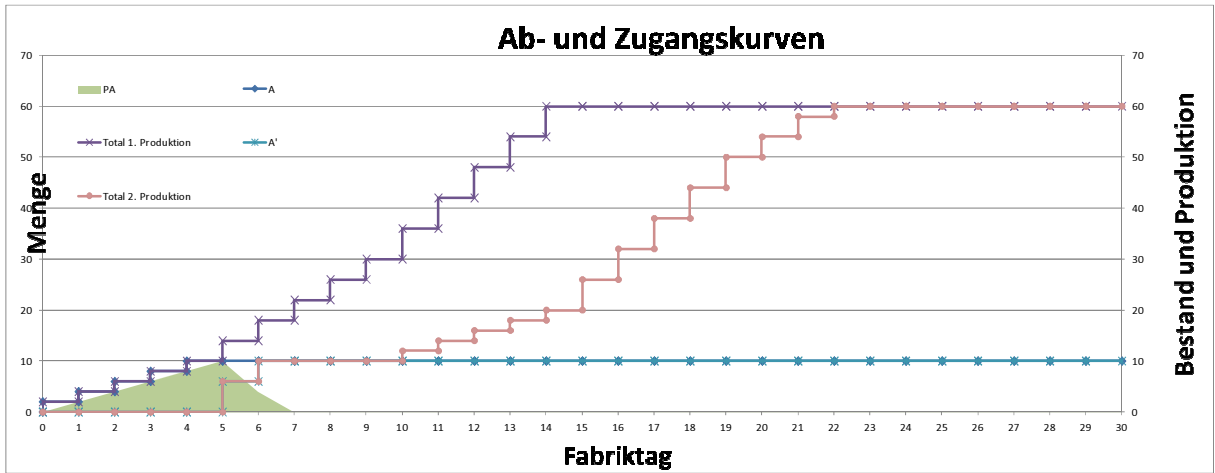


Abbildung 84: Szenario 3 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

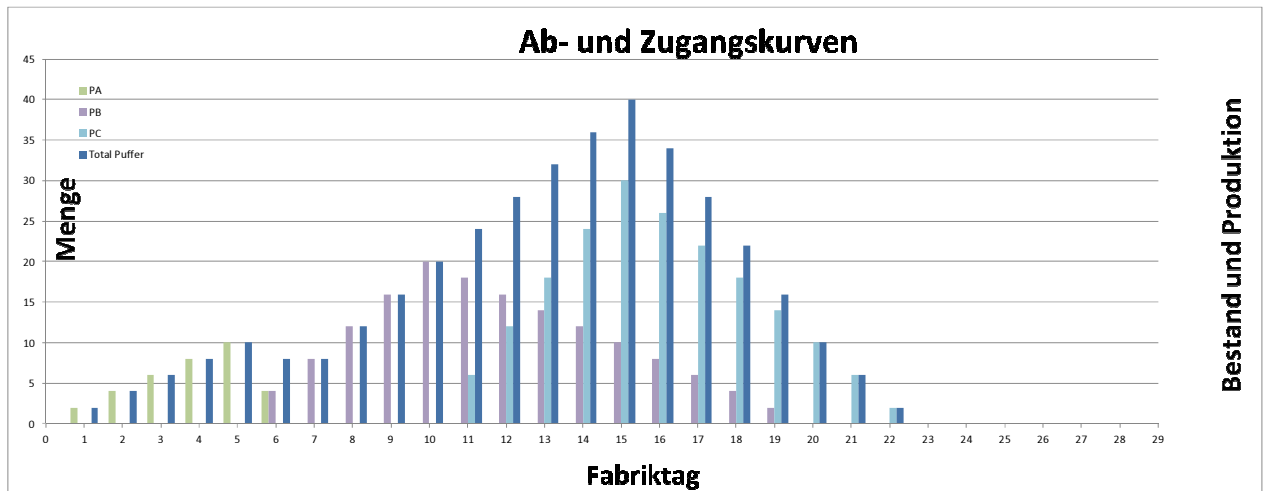


Abbildung 85: Szenario 3 "Losgröße 1 = Losgröße 2"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Die Summe der Losgrößen der einzelnen Produktionsschritte ist gleich groß, jedoch kommt es in diesem Beispiel zu verschiedenen Losgrößen je Variante. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. Zur besseren Übersicht wurden die in Abbildung 83 gemeinsam dargestellten Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen in den darauffolgenden Graphiken getrennt dargestellt. Die Abbildung 85 illustriert zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Bestände in den Puffern. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

b) Losgröße bei Prozess 1 ist größer als Losgröße bei Prozess 2

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im ersten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Darauffolgenden.

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	4
B	8
C	12
2. Produktion	
A'	2
B'	4
C'	6

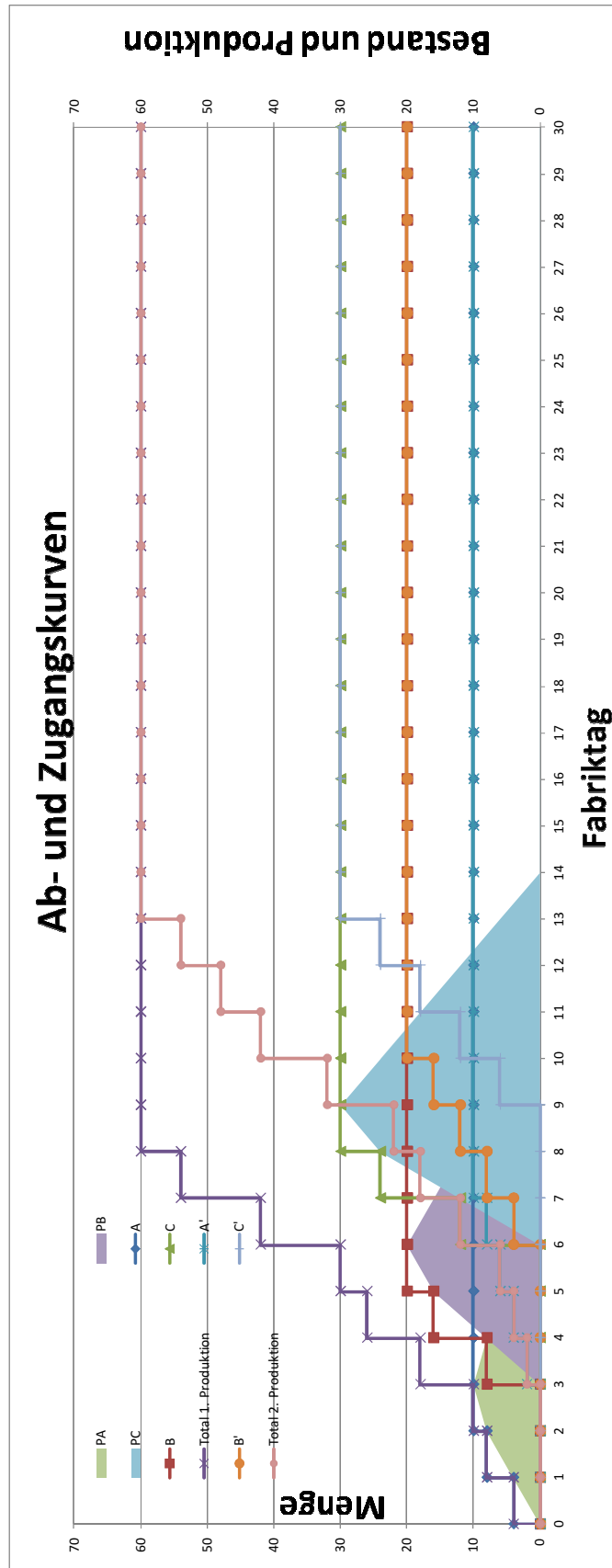


Abbildung 86: Szenario 3 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

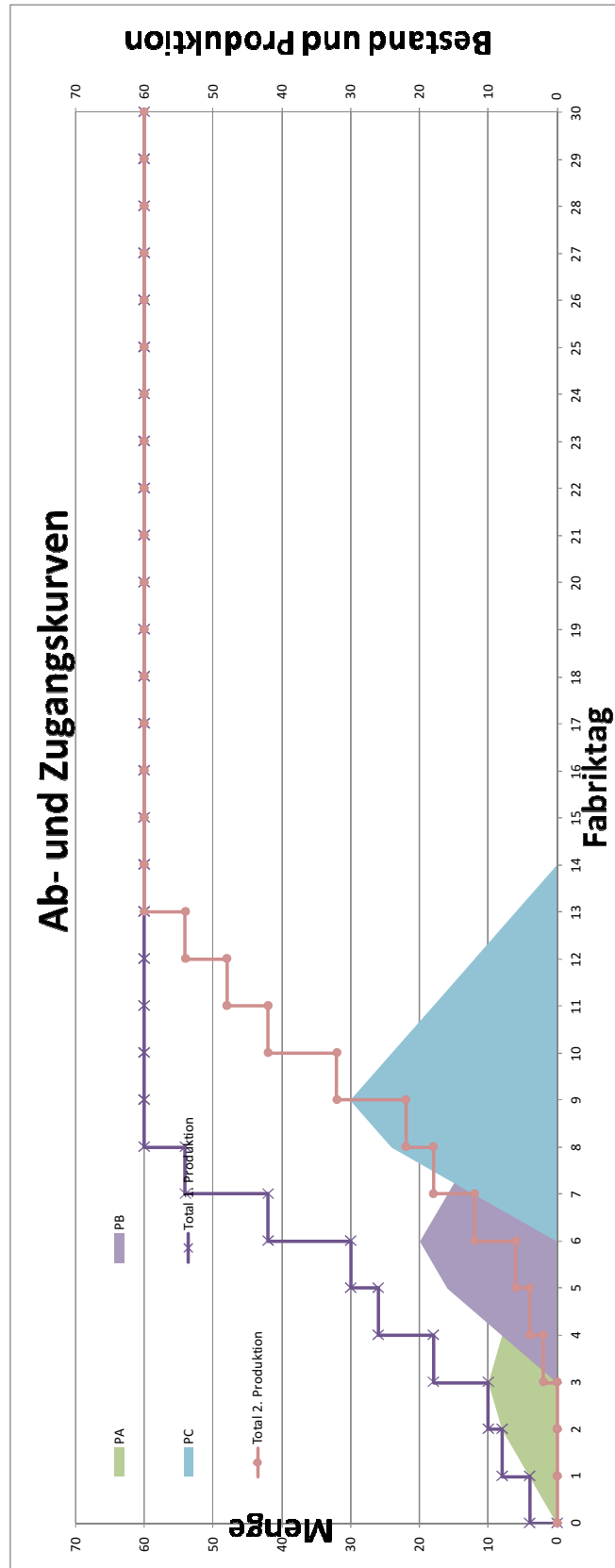


Abbildung 87: Szenario 3 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

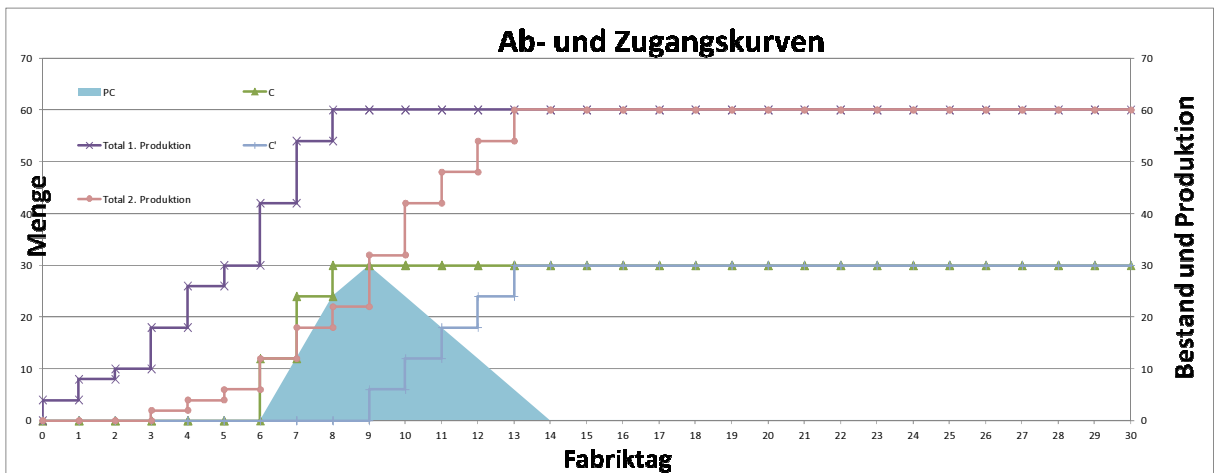
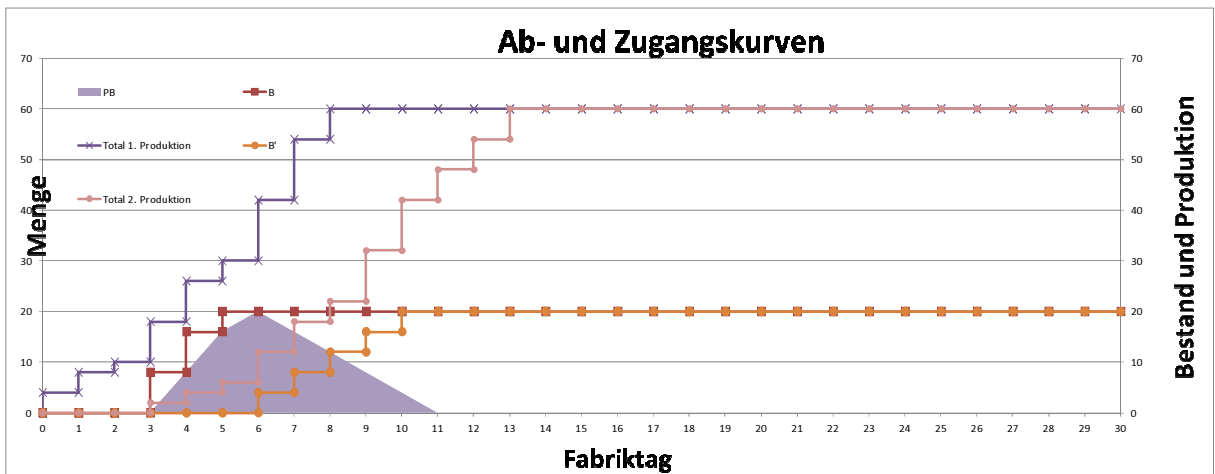
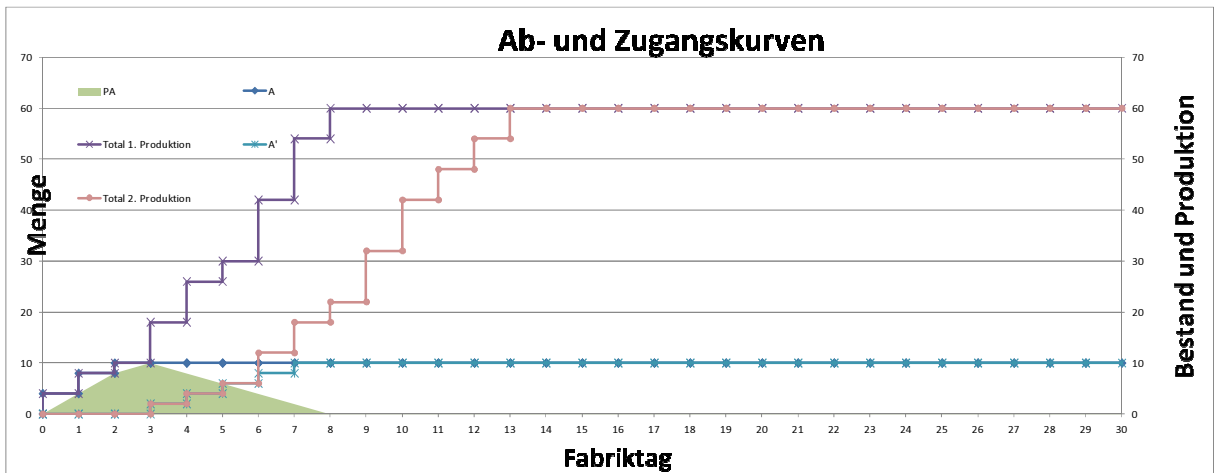


Abbildung 88: Szenario 3 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

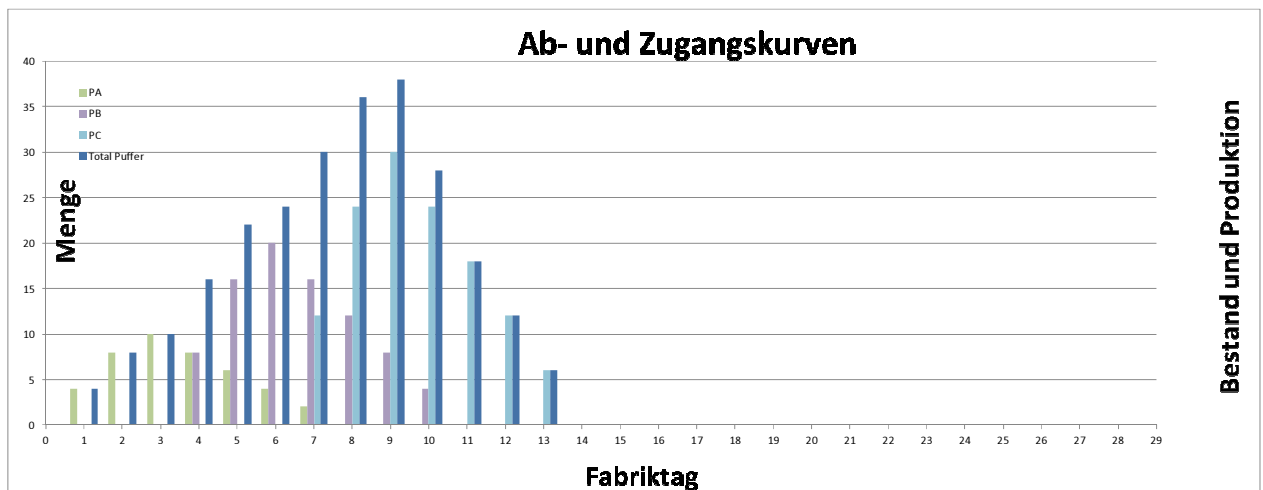


Abbildung 89: Szenario 3 "Losgröße 1 > Losgröße 2"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im ersten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Darauffolgenden. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. Zur besseren Übersicht wurden die in Abbildung 87 gemeinsam dargestellten Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen in den darauffolgenden Graphiken getrennt dargestellt. Die Abbildung 89 illustriert zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Bestände in den Puffern. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

c) Losgröße bei Prozess 2 ist größer als Losgröße bei Prozess 1

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im zweiten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Ersten.

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	2
B	4
C	6
2. Produktion	
A'	4
B'	8
C'	12

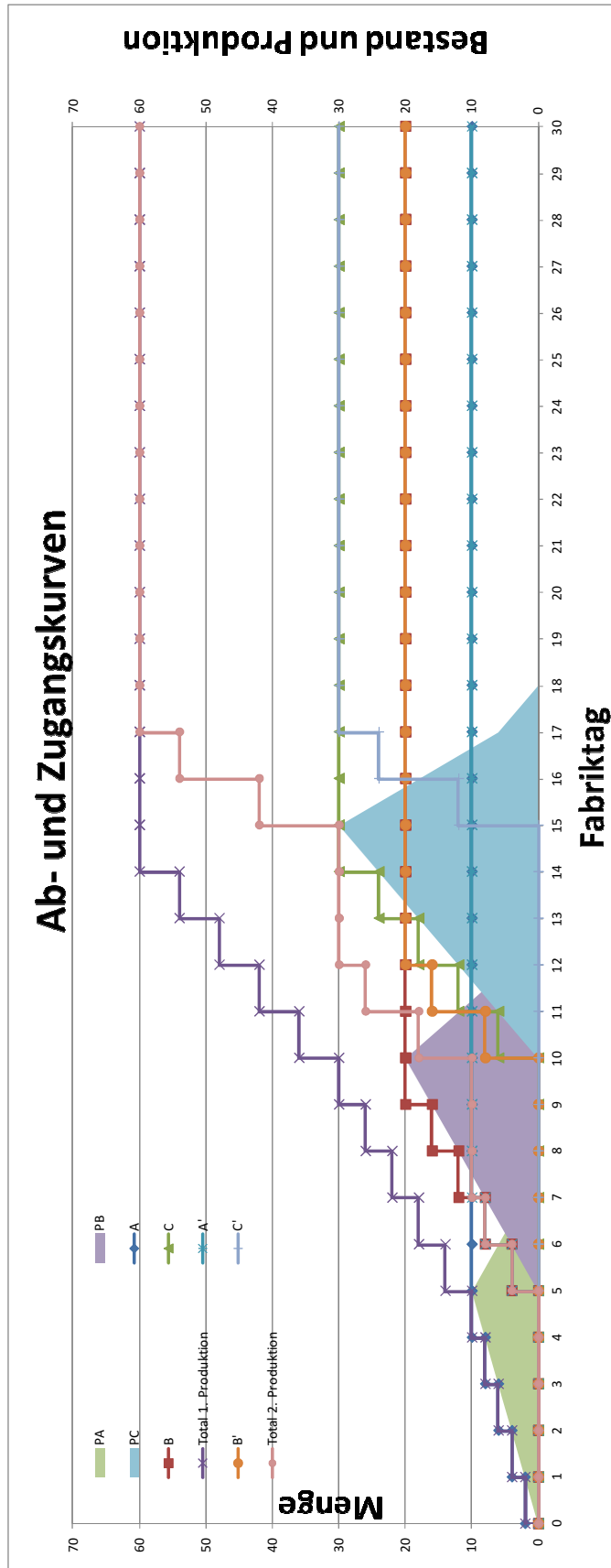


Abbildung 90: Szenario 3 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

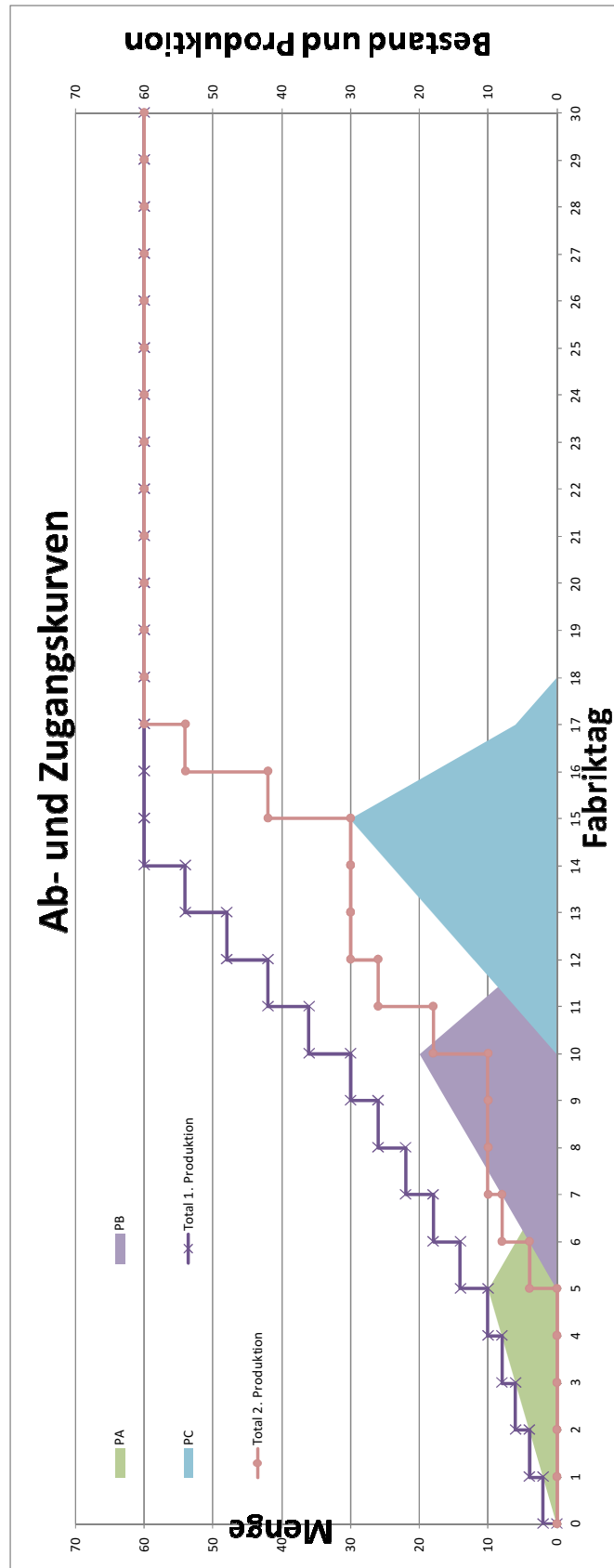


Abbildung 91: Szenario 3 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

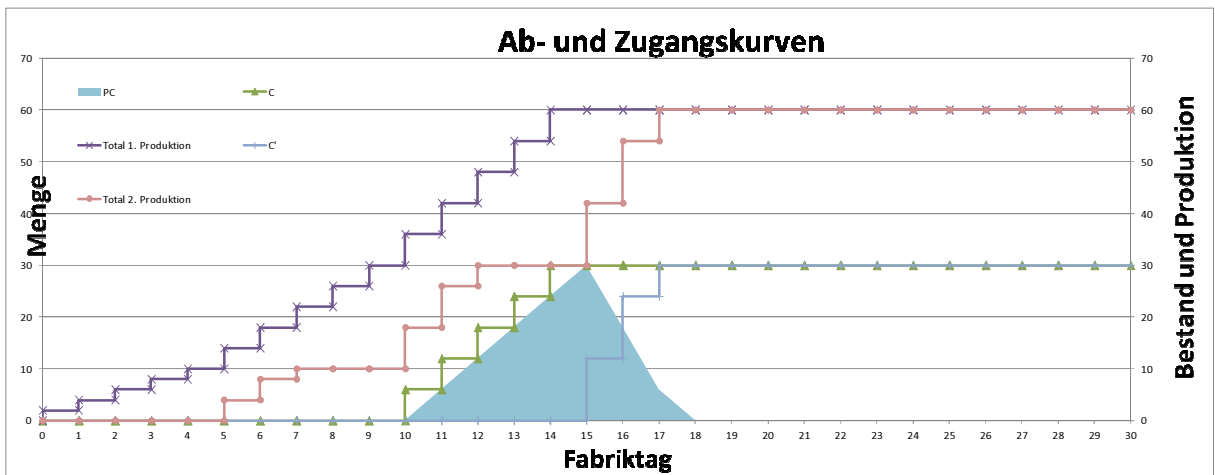
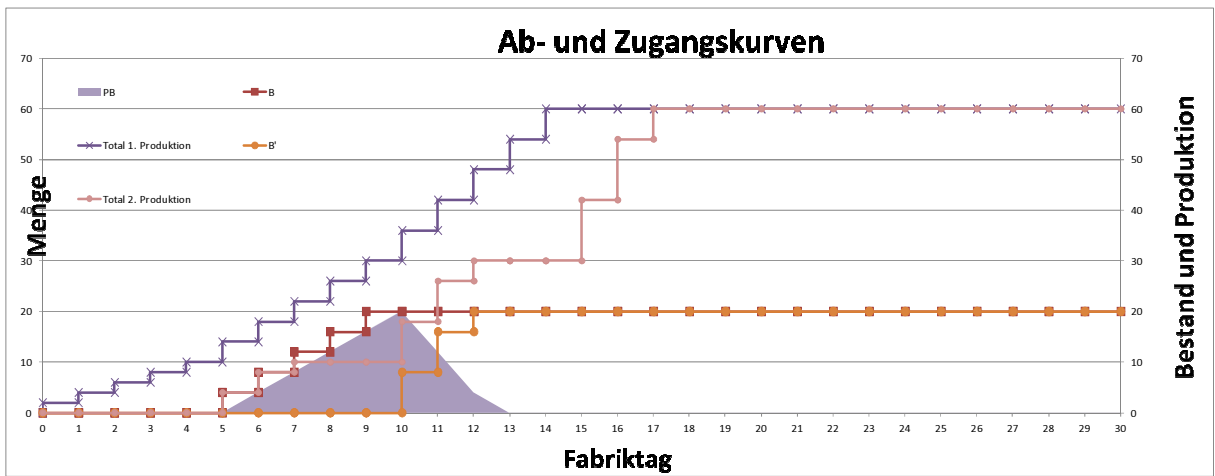
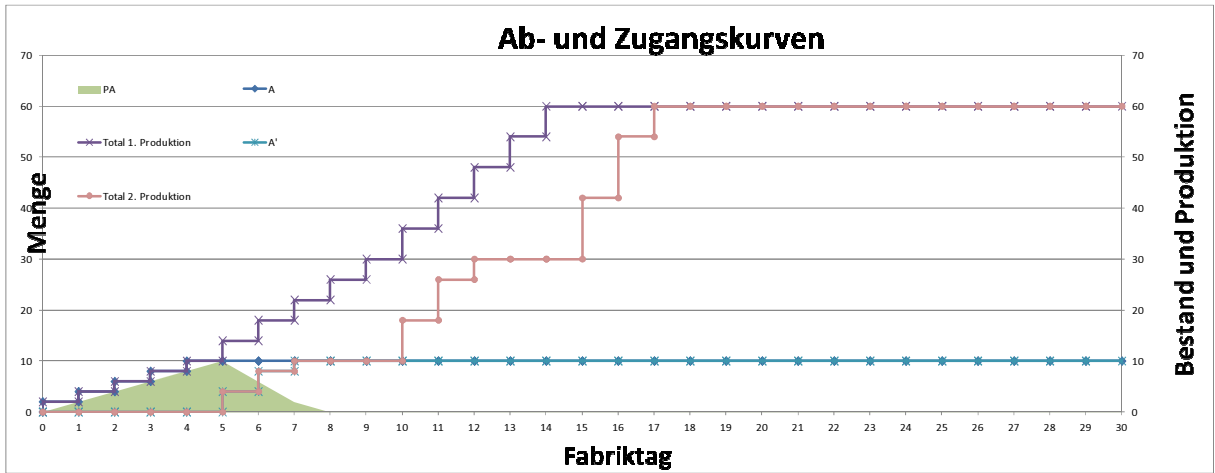


Abbildung 92: Szenario 3 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

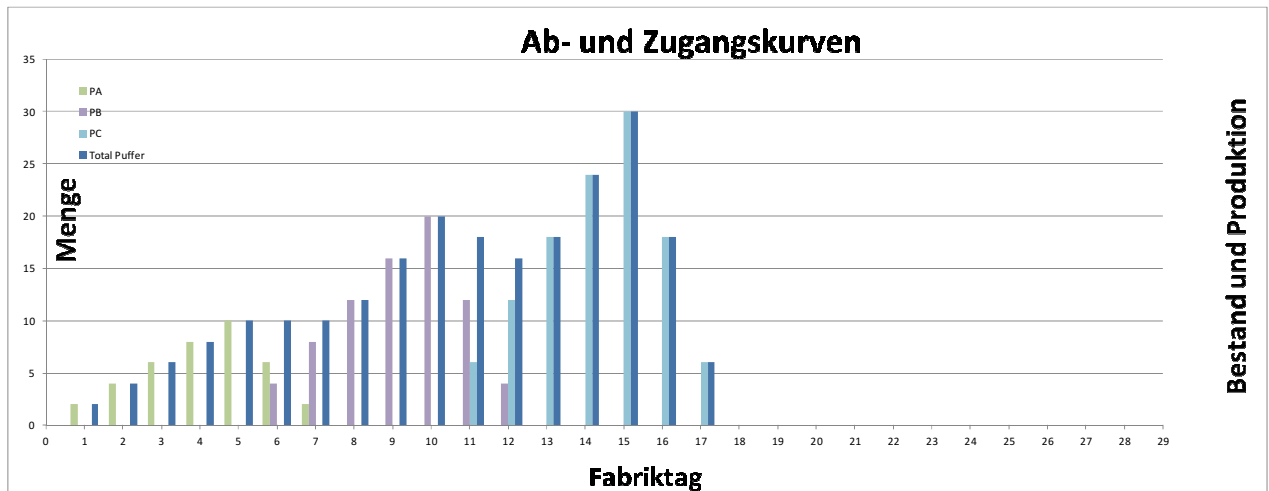


Abbildung 93: Szenario 3 "Losgröße 2 > Losgröße 1"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im zweiten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Ersten. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. Zur besseren Übersicht wurden die in Abbildung 91 gemeinsam dargestellten Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen in den darauffolgenden Graphiken getrennt dargestellt. Die Abbildung 93 illustriert zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Bestände in den Puffern. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

6.3.1 Ausblick Szenario 3

Aus den vorangegangenen Abbildungen ist ersichtlich, dass die Diagramme am wenigsten Bestand aufweisen, bei denen die Losgröße von Prozess 2 größer als die von Prozess 1 sind. So wird daraus diese Aussage abgeleitet:

Wenn man bei Szenario 3 am Prozess 2 Losgrößen produziert, die größer sind als bei Prozess 1, dann wird sich weniger Bestand zwischen den Prozessen bilden, was wünschenswerter für die Produktion ist.

6.4 Szenario 4

Es gibt drei Varianten von den Produkten, nämlich A, B und C.

Unter "1. Produktion" ist der erste Prozess und unter "2. Produktion" ist der zweite, nacheinanderfolgende Prozess zu verstehen. Der erste Prozess hat ein Produktionsziel. Bei dieser Szenario beginnt der zweite Prozess einer Variante mit dem Produzieren, ohne darauf zu warten, dass der erste Prozess dieser Variante das Produktionsziel erreicht hat. Es muss nur die genaue Anzahl produziert sein, welche der zweite Prozess braucht, um weiter zu produzieren. (d. h. B` beginnt erst mit dem Produzieren, wenn A` fertig ist. Es muss dabei nicht erfüllt sein, dass B sein Produktionsziel erreicht hat. Wenn A und B fertig sind, aber A` nicht fertig, so darf B` nicht beginnen. C` beginnt erst mit dem Produzieren, wenn B` mit dem Produzieren fertig ist. Wenn A, B und C fertig sind, aber B` noch nicht fertig ist, darf C´ nicht beginnen.) Es werden dieses Mal verschiedene Reihenfolgen untersucht, wobei sich die Reihenfolgen beim zweiten Prozess ändern.

Weil man aus A`-C`-B` und aus C`-B`-A` ganz ähnliche Ergebnisse wie aus C`-A`-B` bekommt, wird auf die beiden Reihenfolgen bei der Untersuchung verzichtet.

- a) Bei beiden Prozesse sind in Summe die Losgrößen gleich

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	2
B	4
C	6
2. Produktion	
A'	6
B'	2
C'	4

➤ Reihenfolge A` –B`–C`

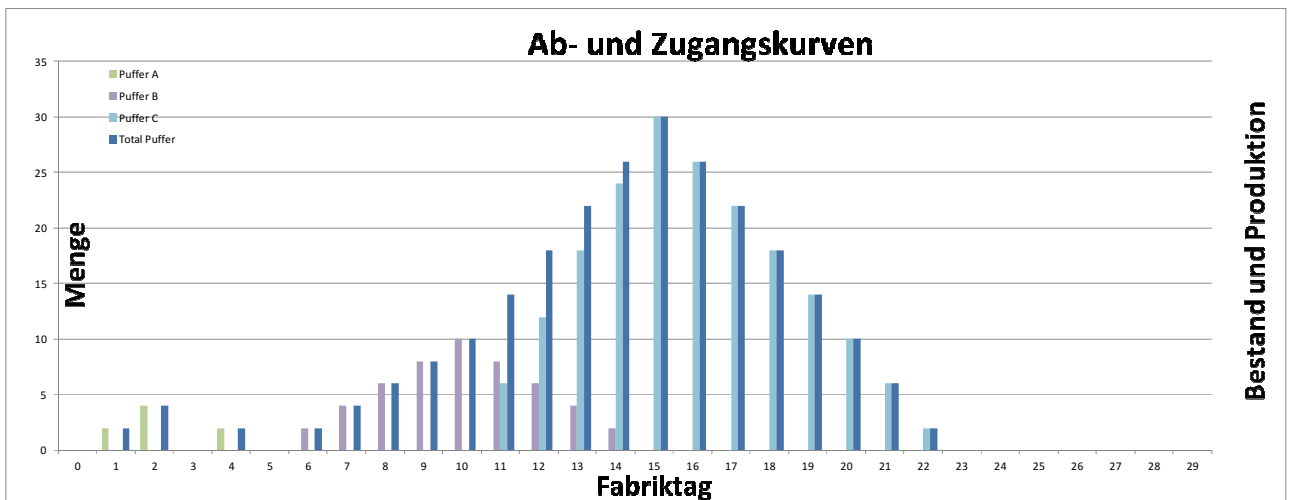
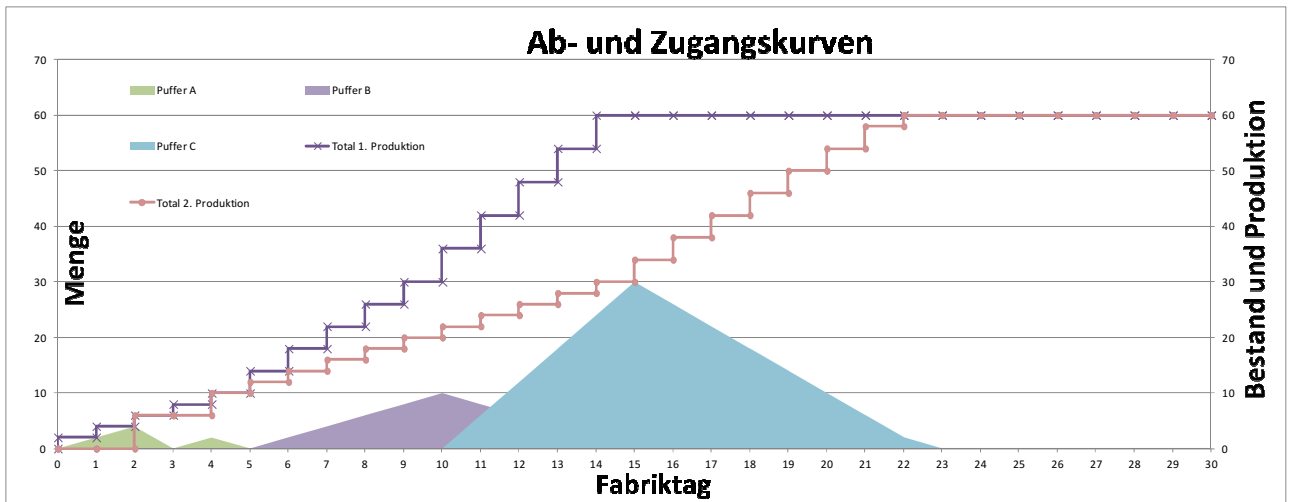
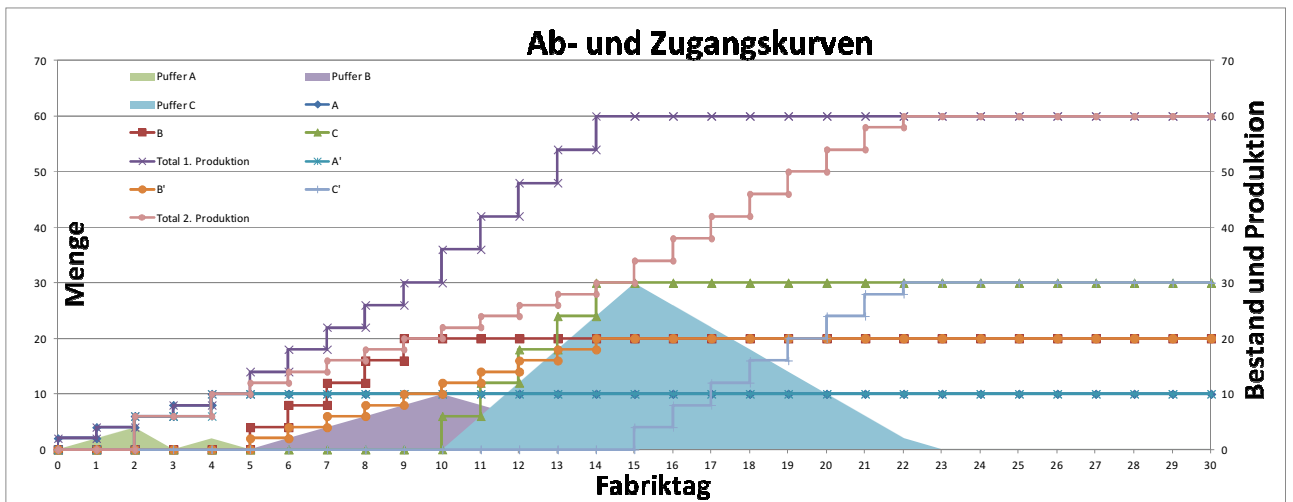


Abbildung 94: Szenario 4 ABC "Losgröße 1= Losgröße 2"

➤ Reihenfolge C` - A` - B`

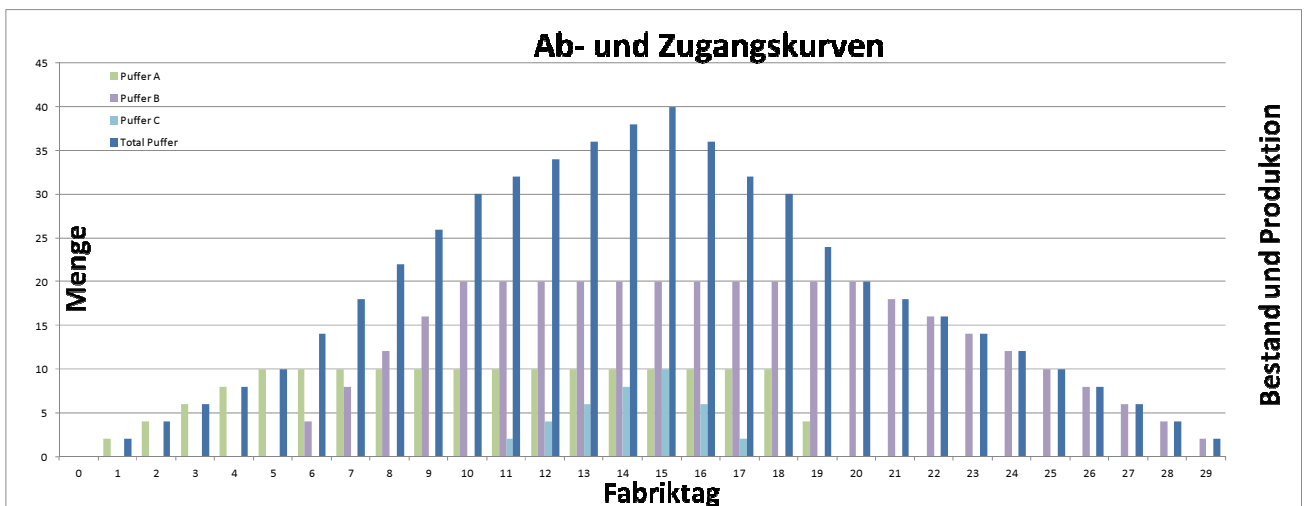
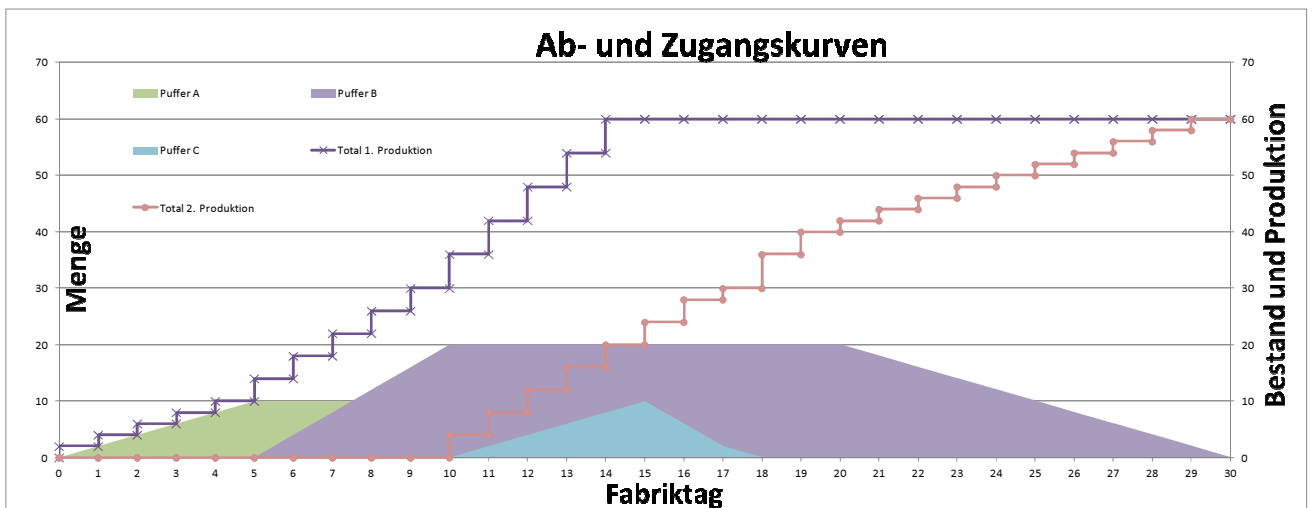
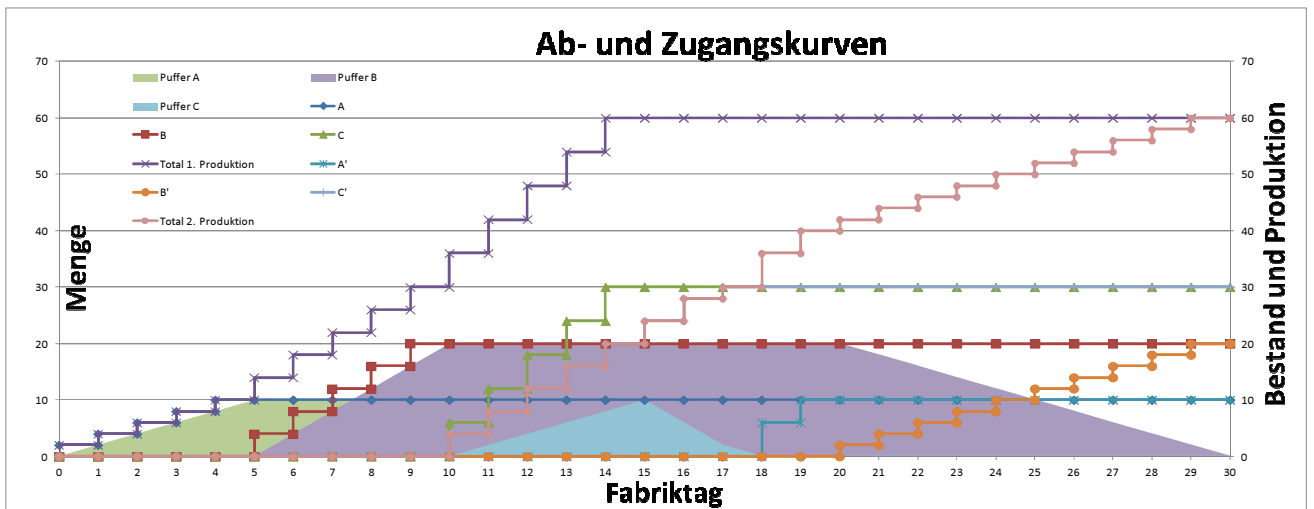


Abbildung 95: Szenario 4 CAB "Losgröße 1= Losgröße 2"

➤ Reihenfolge B` - C` - A`

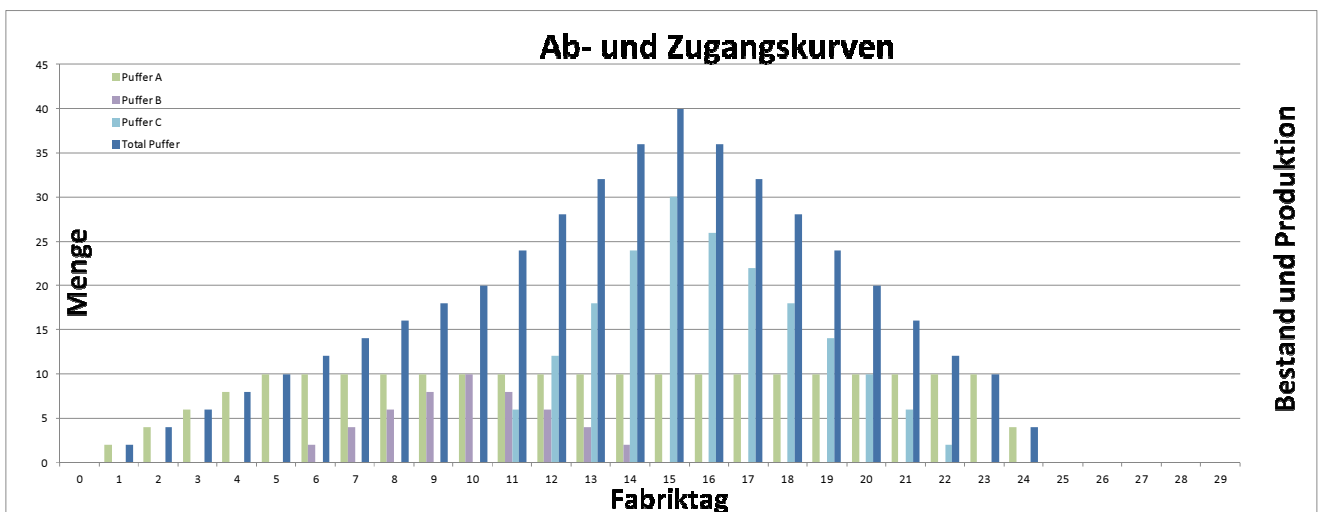
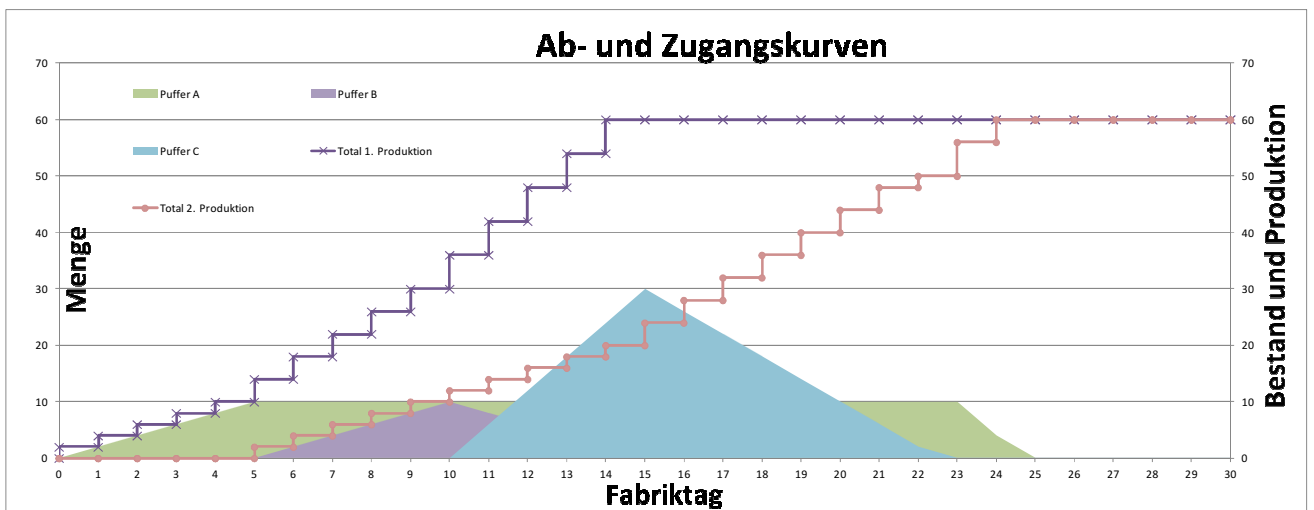
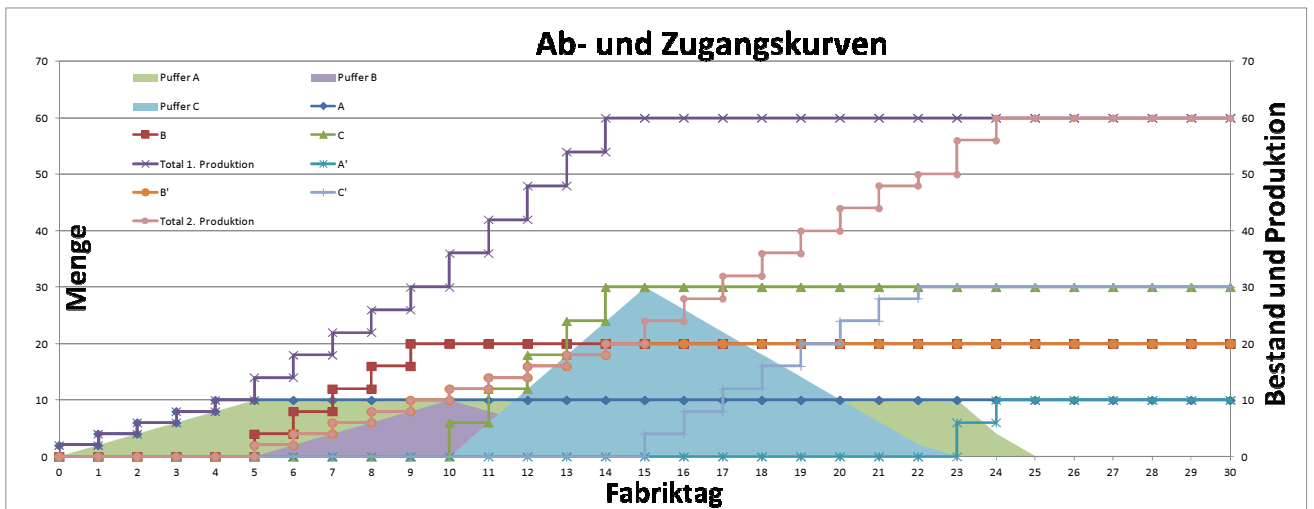


Abbildung 96: Szenario 4 BCA "Losgröße 1= Losgröße 2"

➤ Reihenfolge B` - A` - C`

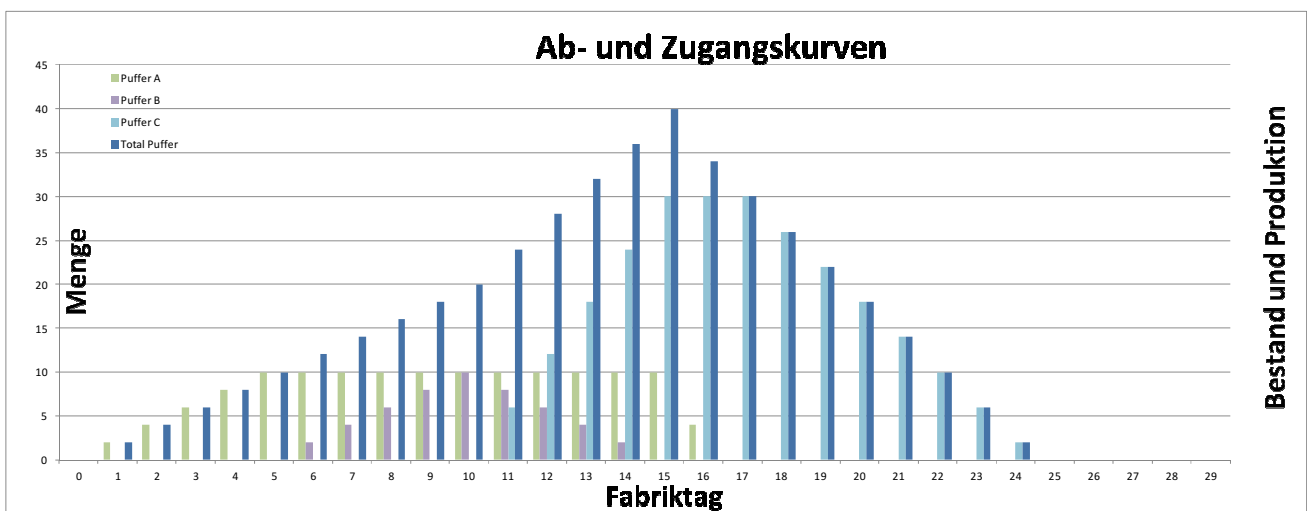
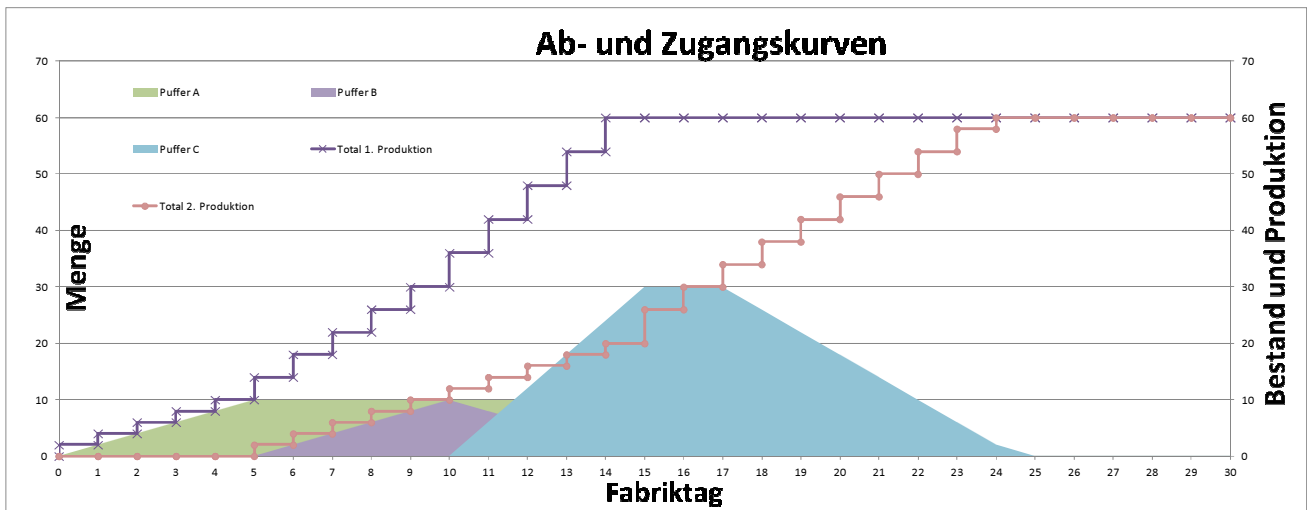
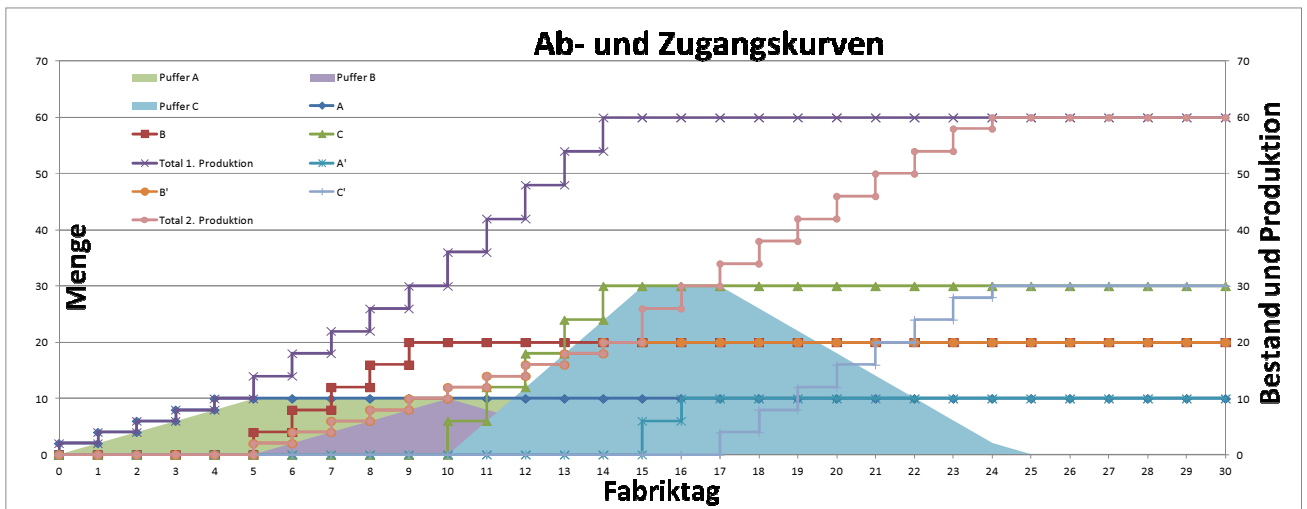


Abbildung 97: Szenario 4 BAC "Losgröße 1= Losgröße 2"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Die Summe der Losgrößen der einzelnen Produktionsschritte ist gleich groß, jedoch kommt es in diesem Beispiel zu verschiedenen Losgrößen je Variante. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. In Abbildung 94, 95, 96 und 97 wurden Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen dargestellt. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

Mit Hilfe dieser Diagrammen wird ersichtlich, bei welcher Reihenfolge der Bestand am geringsten bleibt. Der geringste Bestand erweist sich, wenn die Reihenfolge der Varianten bei Prozess 1 gleich wie die Reihenfolge bei Prozess 2 ist, nämlich wenn $ABC = A`B`C`$ ist.

b) Losgröße bei Prozess 1 ist größer als Losgröße bei Prozess 2

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im ersten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Darauffolgenden.

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	4
B	8
C	12
2. Produktion	
A'	2
B'	4
C'	6

➤ Reihenfolge A` - B` - C`

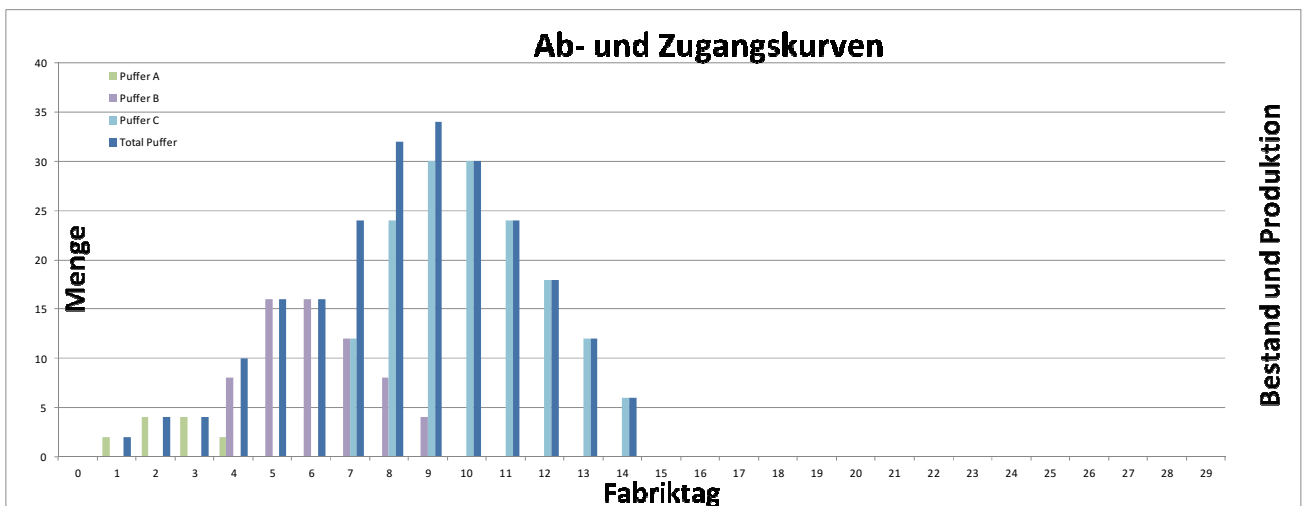
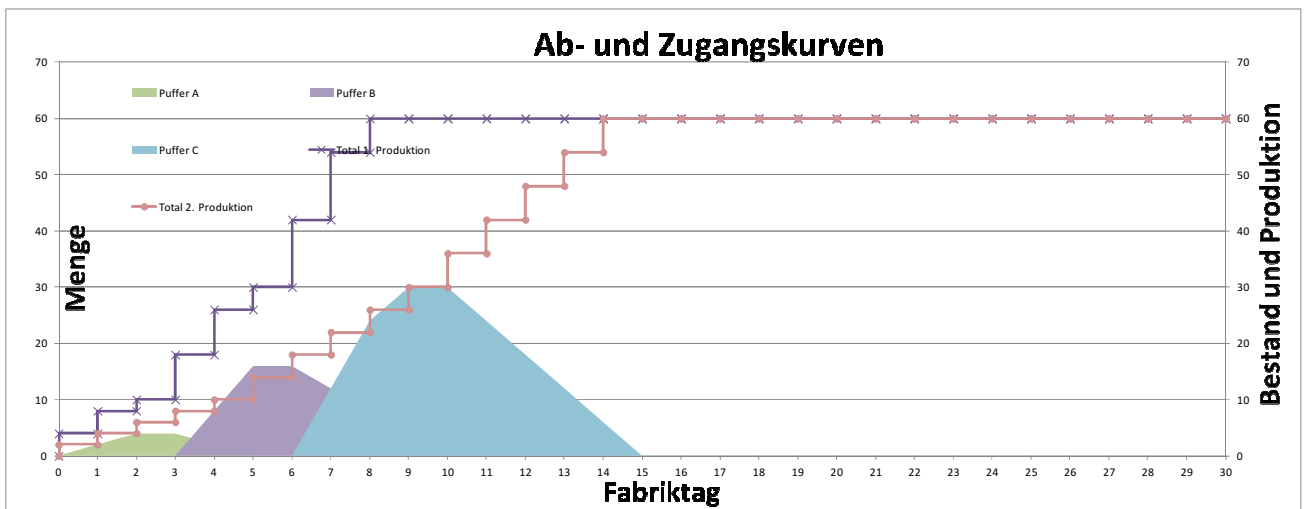
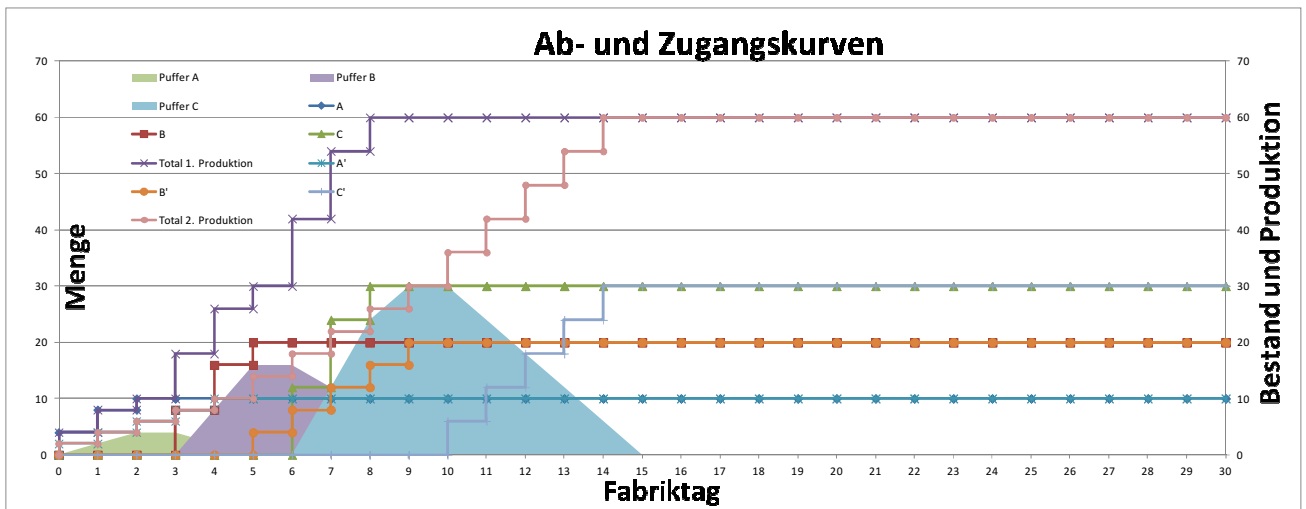


Abbildung 98: Szenario 4 ABC "Losgröße 1 > Losgröße 2"

➤ Reihenfolge C` - A` - B`

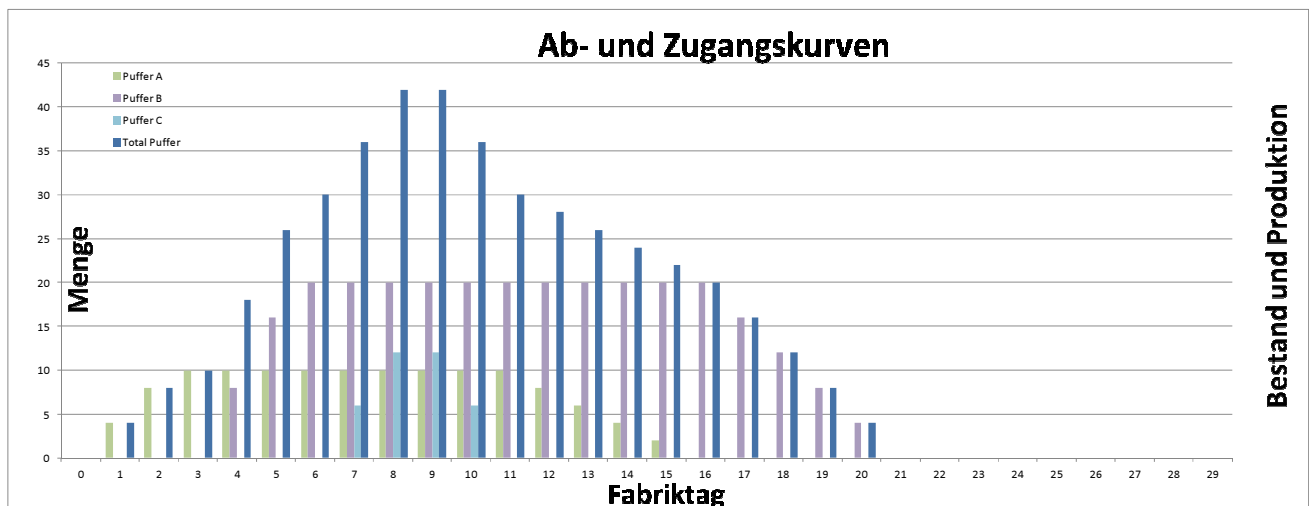
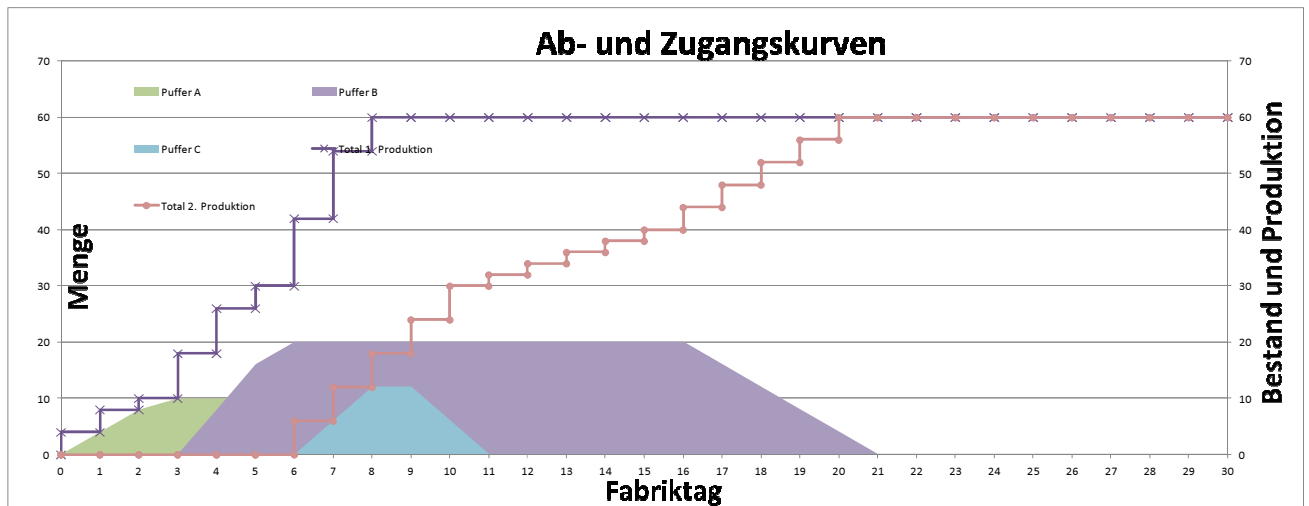
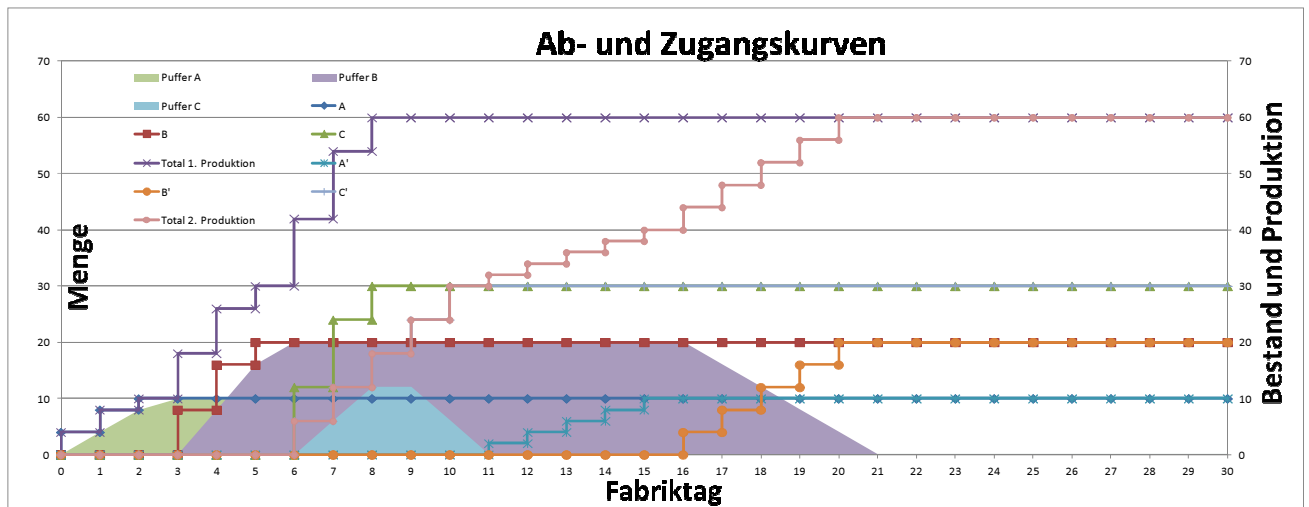


Abbildung 99: Szenario 4 CAB "Losgröße 1 > Losgröße 2"

➤ Reihenfolge B` - C` - A`

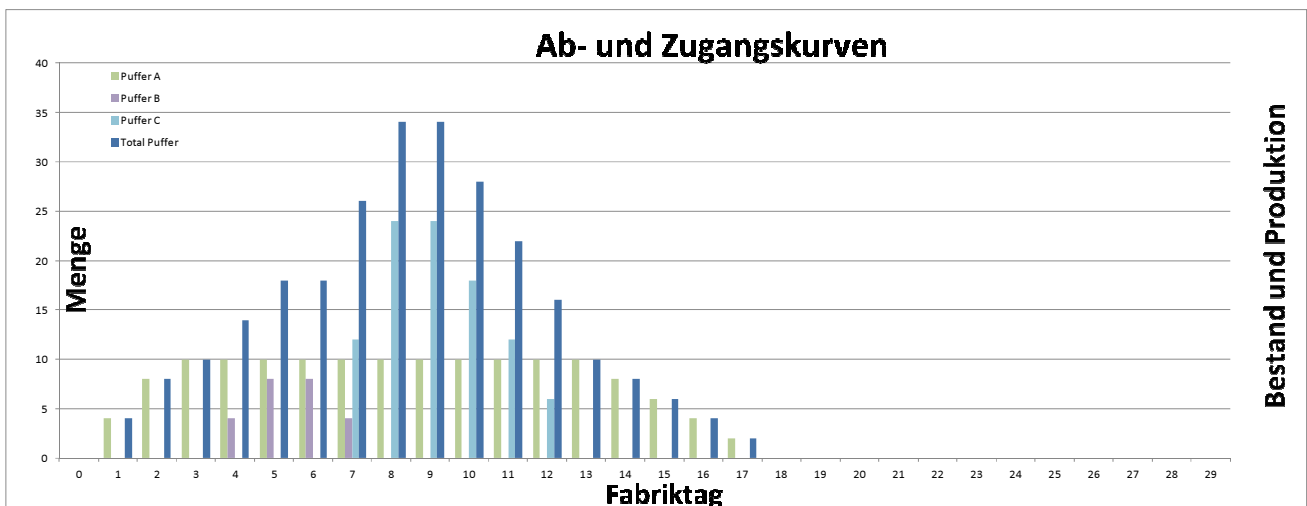
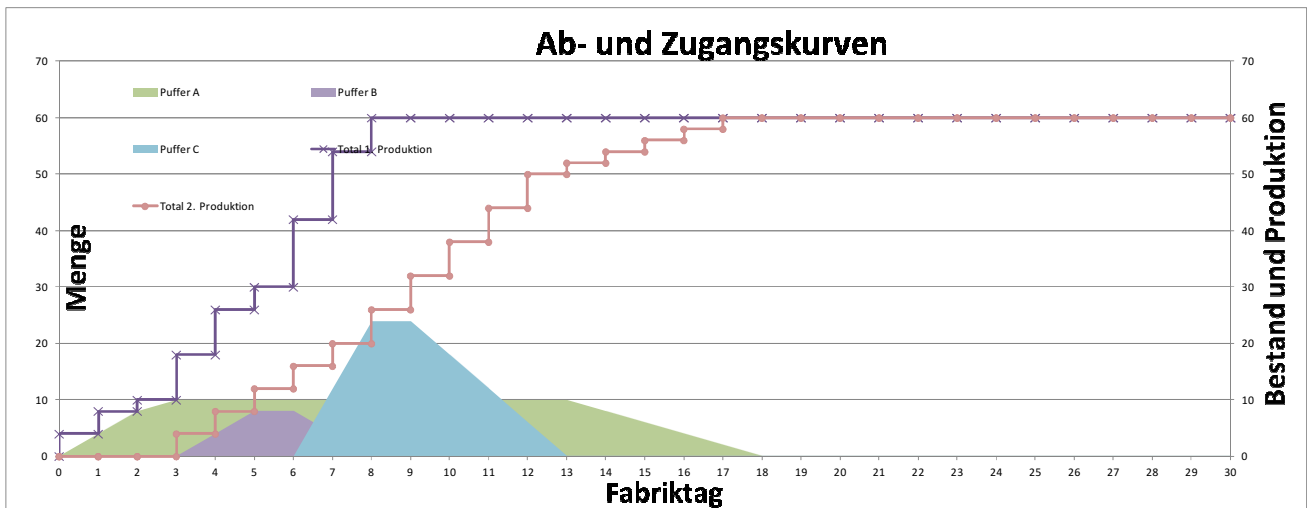
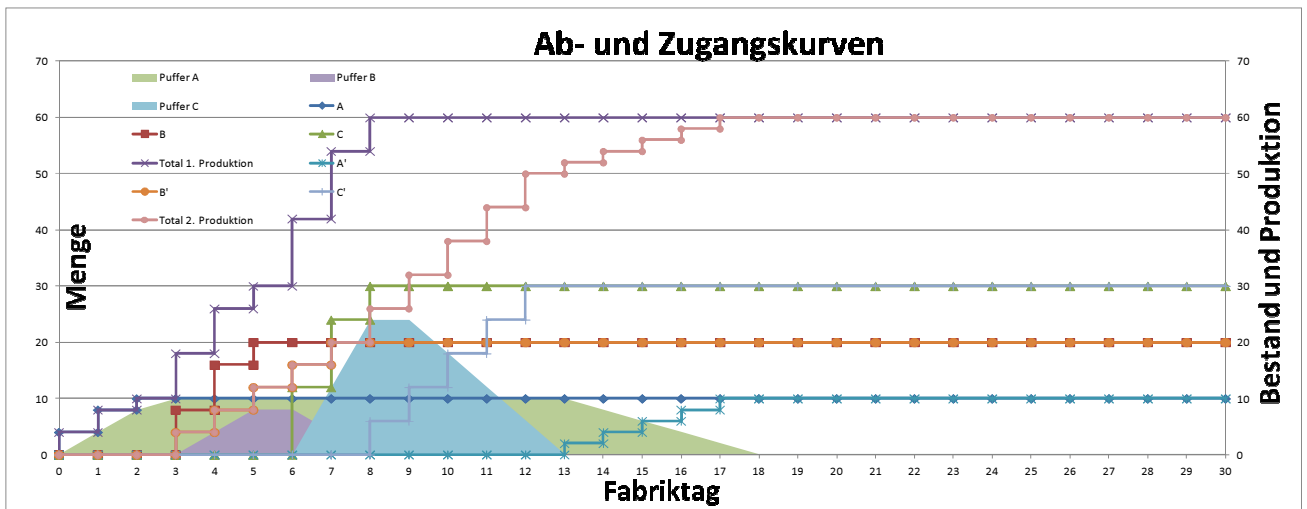


Abbildung 100: Szenario 4 BCA "Losgröße 1 > Losgröße 2"

➤ Reihenfolge B` - A` - C`

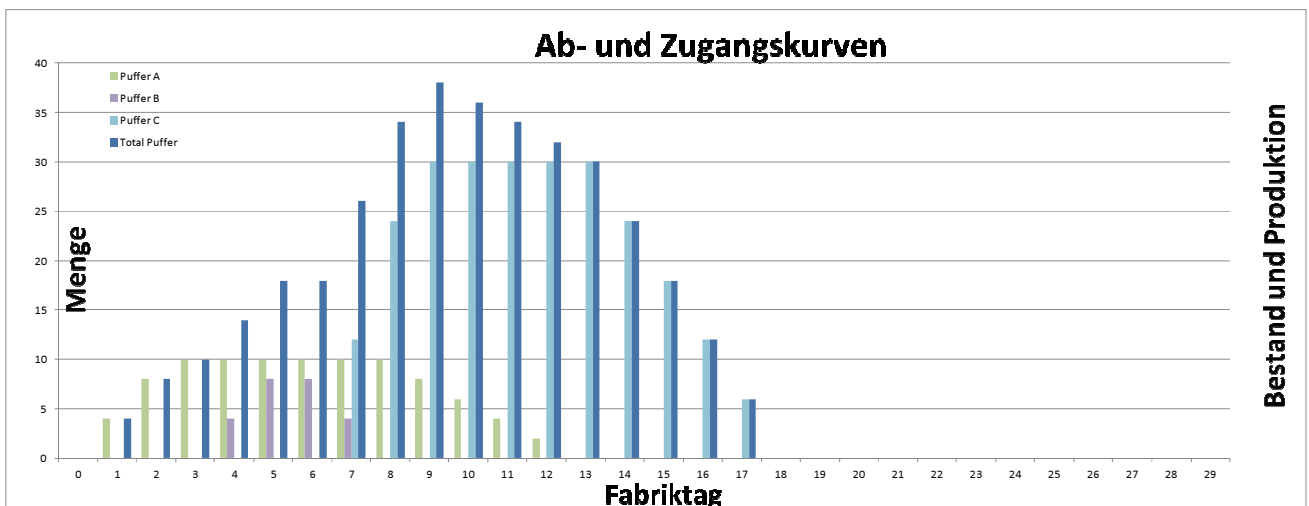
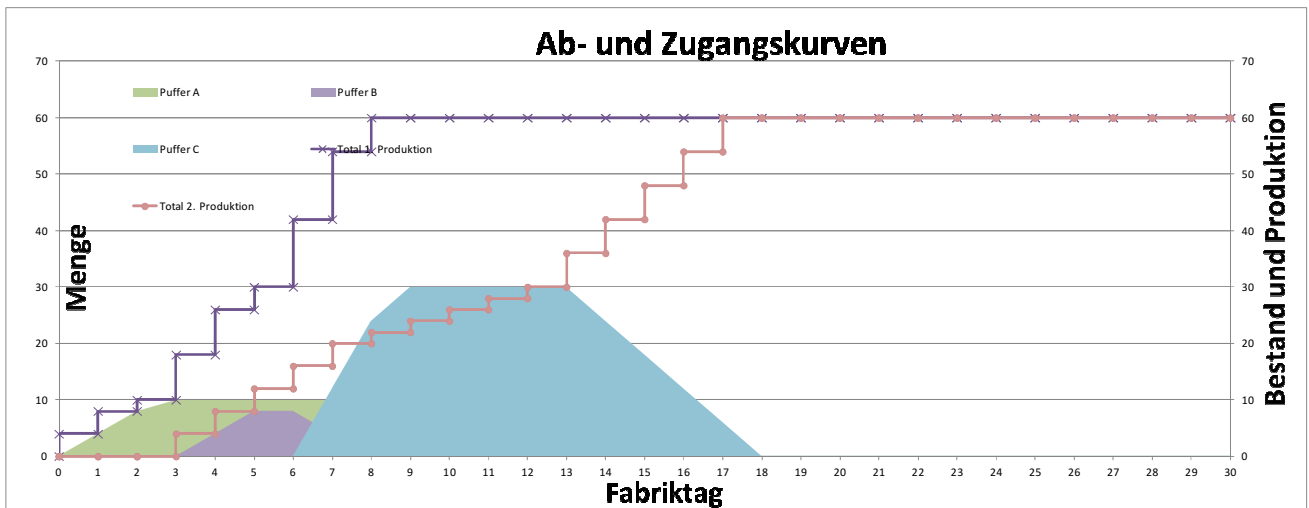
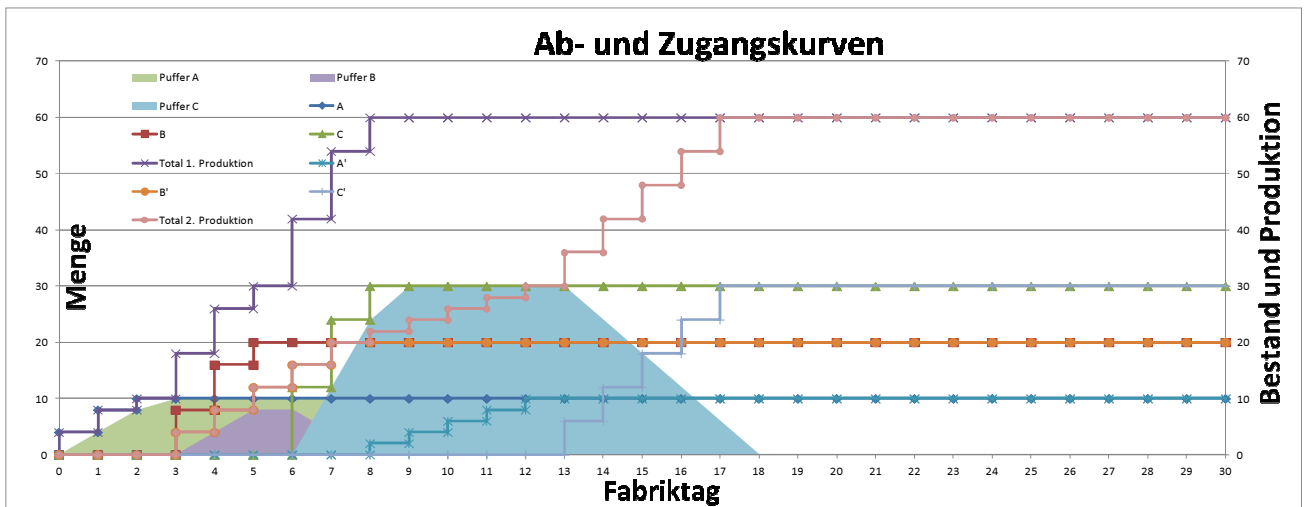


Abbildung 101: Szenario 4 BAC "Losgröße 1 > Losgröße 2"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschrittes. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im ersten Produktionsschritt doppelt so groß wie im darauffolgenden. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. In Abbildung 98, 99, 100 und 101 wurden Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen dargestellt. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

Mit Hilfe dieser Diagrammen wird ersichtlich, bei welcher Reihenfolge der Bestand am geringsten bleibt. Der geringste Bestand erweist sich, wenn die Reihenfolge der Varianten bei Prozess 1 gleich wie die Reihenfolge bei Prozess 2 ist, nämlich wenn $ABC = A`B`C`$ ist.

c) Losgröße bei Prozess 2 ist größer als Losgröße bei Prozess 1

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im zweiten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Ersten.

Ziel	
A	10
B	20
C	30
1. Produktion	
A	2
B	4
C	6
2. Produktion	
A'	4
B'	8
C'	12

➤ Reihenfolge A` - B` - C`

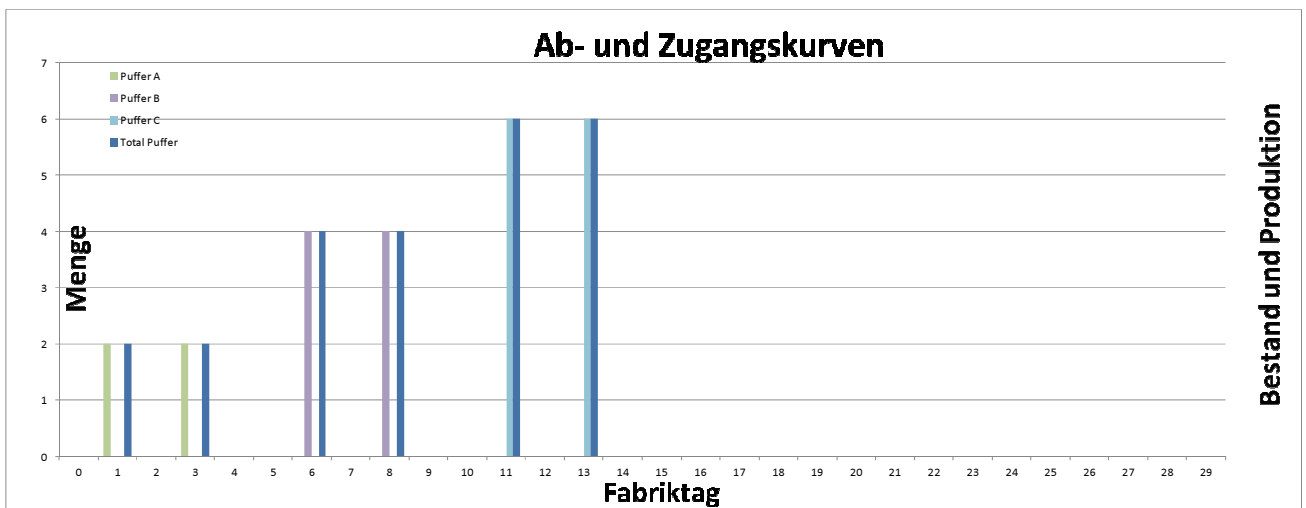
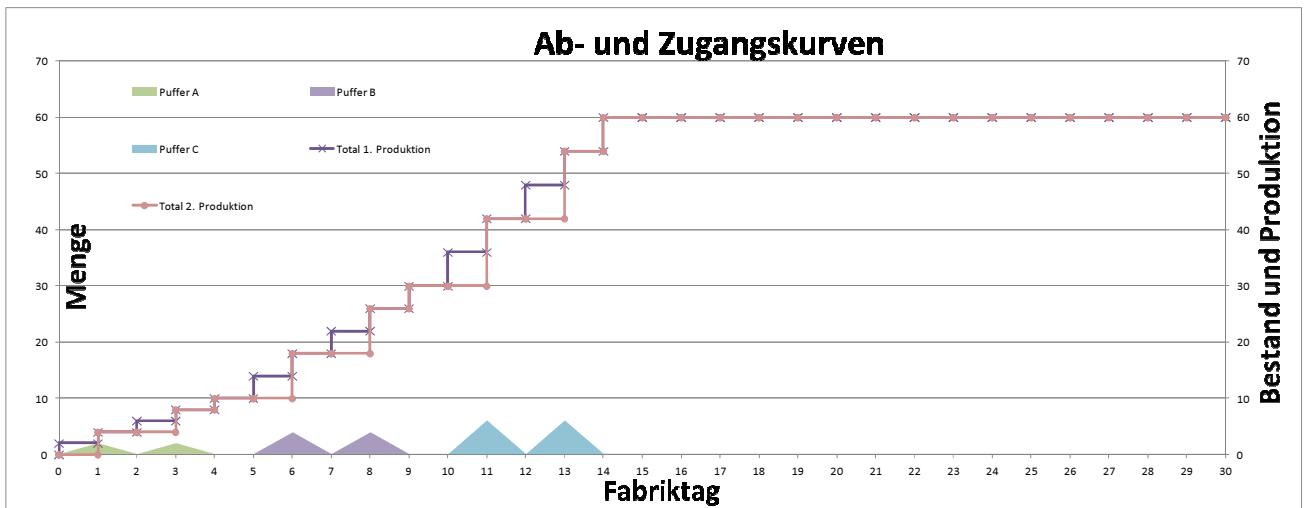
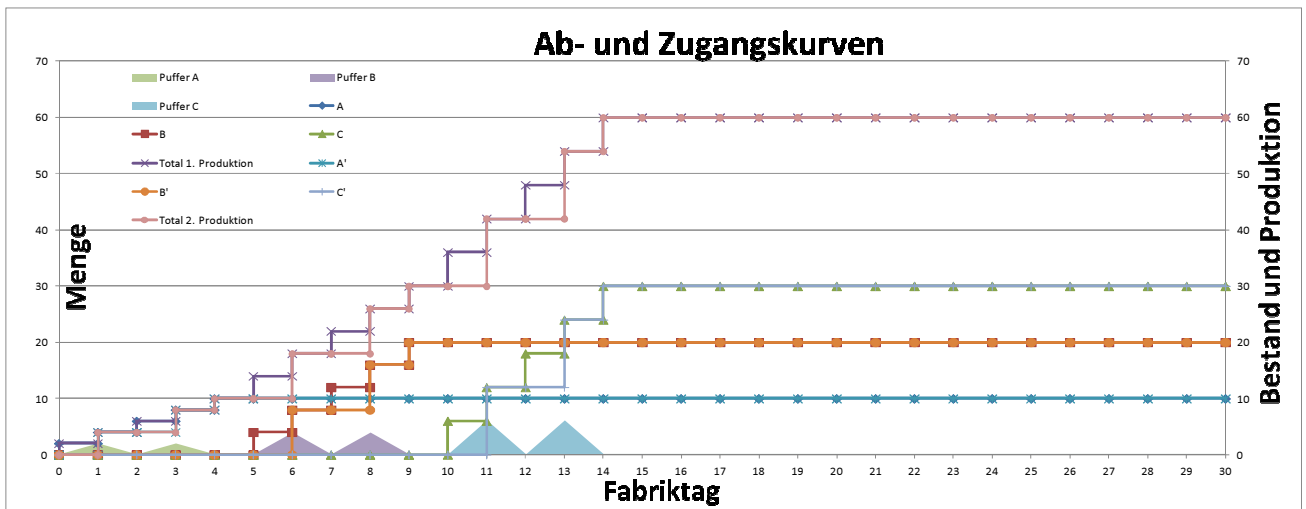


Abbildung 102: Szenario 4 ABC "Losgröße 2 > Losgröße 1"

➤ Reihenfolge C` - A` - B`

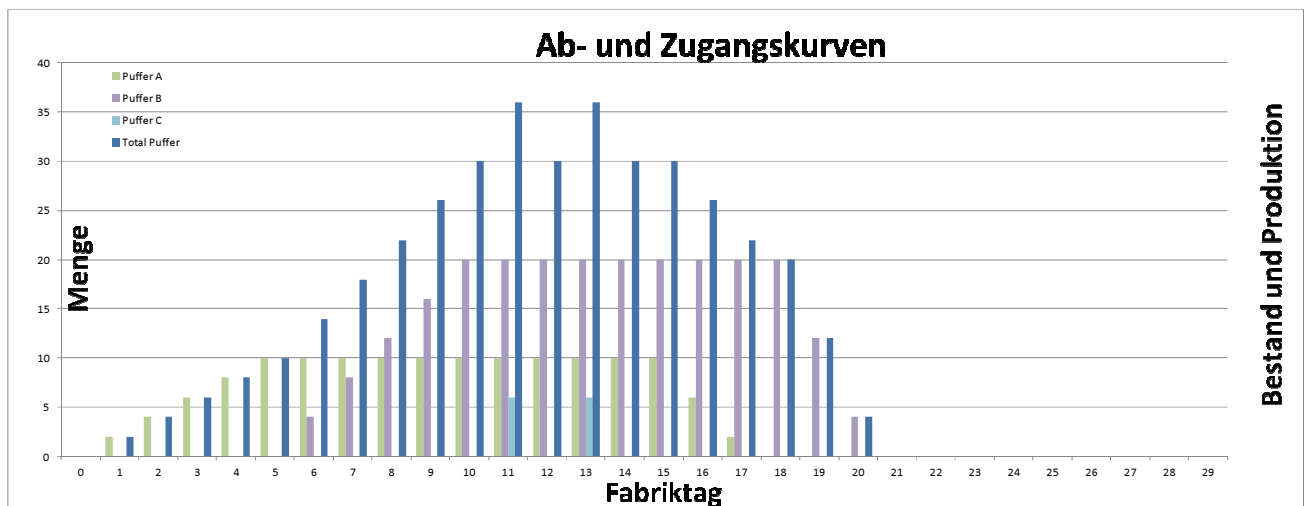
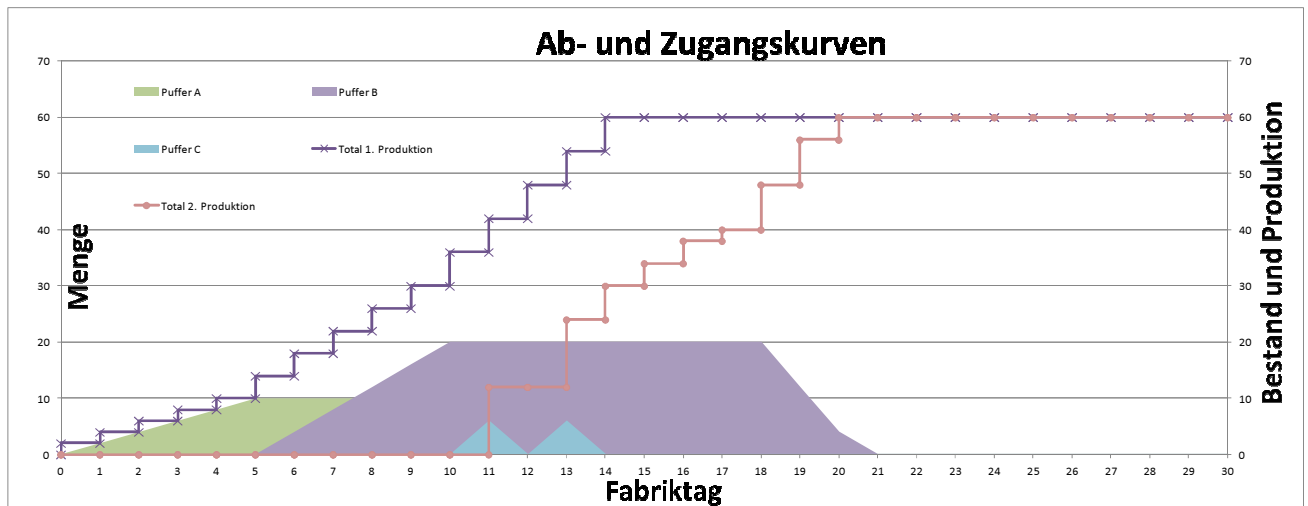
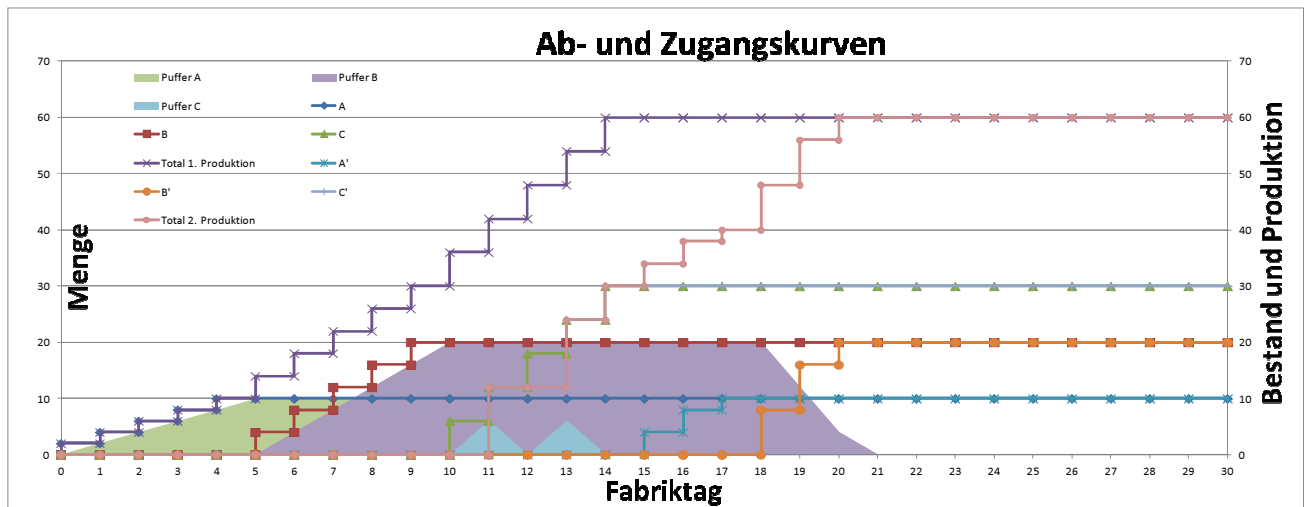


Abbildung 103: Szenario 4 CAB "Losgröße 2 > Losgröße 1"

➤ Reihenfolge B` - C` - A`

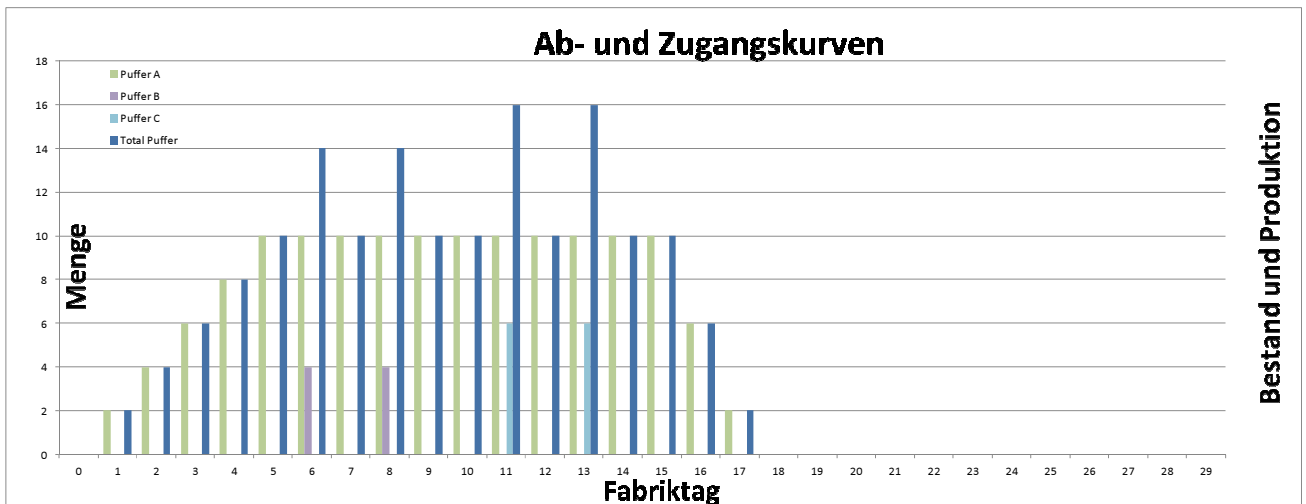
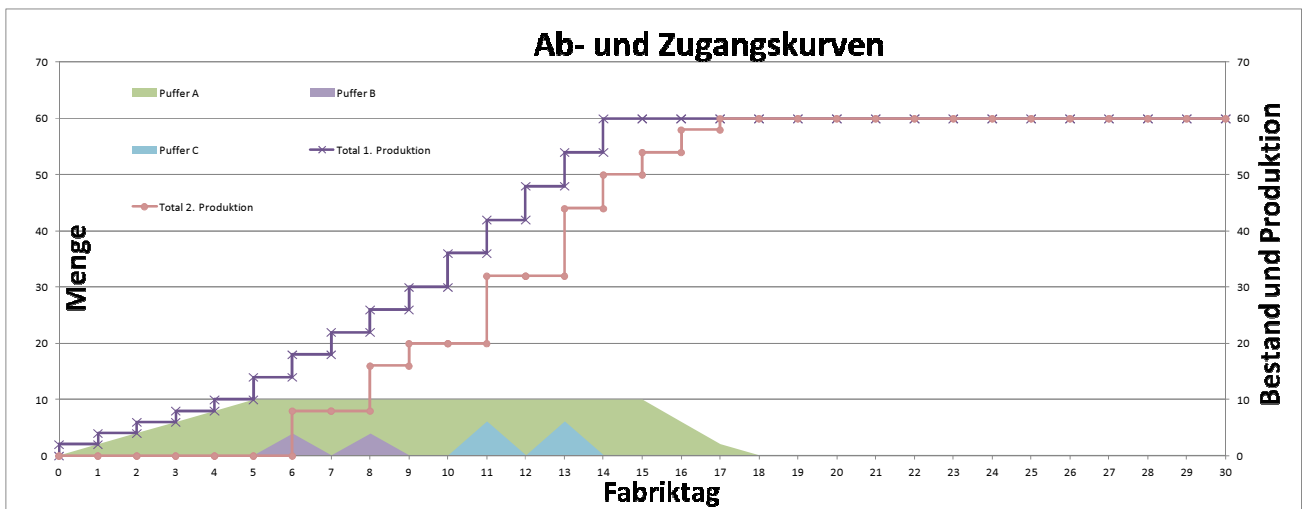
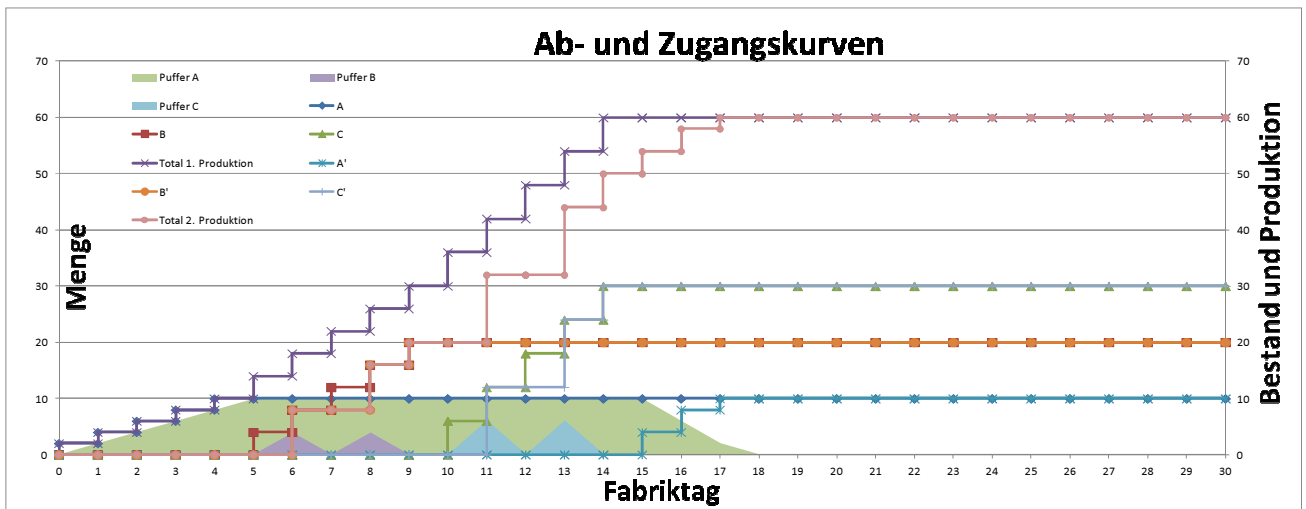


Abbildung 104: Szenario 4 BCA "Losgröße 2 > Losgröße 1"

➤ Reihenfolge B` - A` - C`

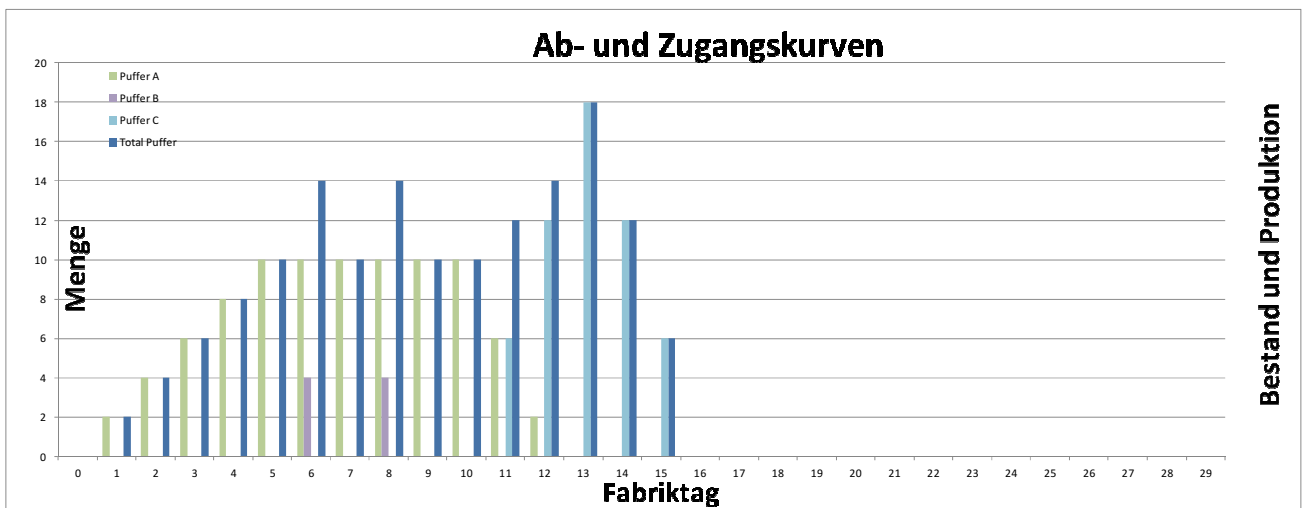
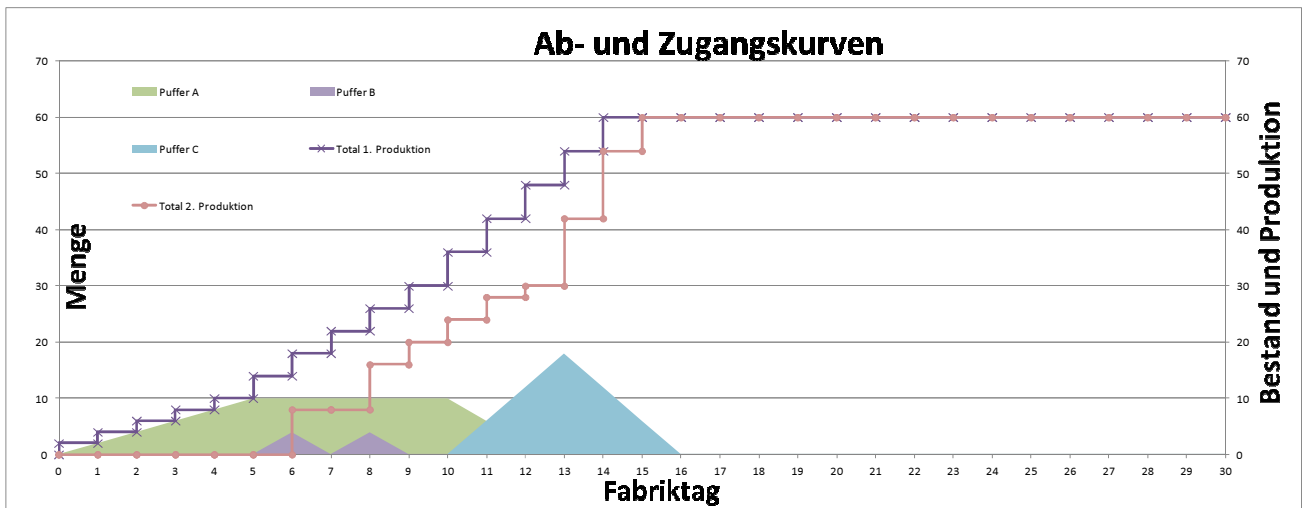
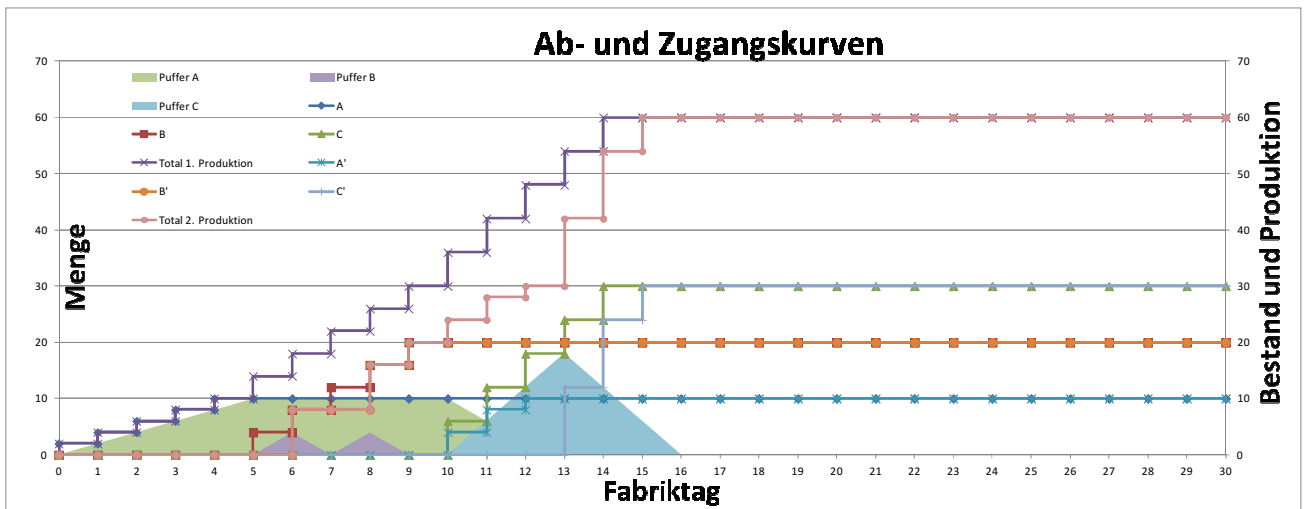


Abbildung 105: Szenario 4 BAC "Losgröße 2 > Losgröße 1"

Die zuvor angeführten Abbildungen zeigen die Zugangs- und Abgangskurven der jeweiligen ersten und zweiten Produktionsschritte. Die Stufenhöhe dieser Kurven spiegelt die Bearbeitung der jeweiligen Produktvariante wieder. Die Stufenlänge charakterisiert die zur Bearbeitung benötigte Zeit.

Bei diesem Beispiel ist die Summe der Losgrößen im zweiten Produktionsschritt doppelt so groß wie im Ersten. Haben die einzelnen Produktionsprozesse ihre Ziele erreicht, stellen diese ihre Arbeit ein.

Die farbig dargestellten Dreiecke bilden flächenmäßig den sich bildenden Puffer ab. In Abbildung 102, 103, 104 und 105 wurden Zu- und Abgangskurven der einzelnen Produktvarianten und die zugehörigen Pufferflächen dargestellt. Man erkennt deutlich die Überschneidungsbereiche der Pufferbestände, welche zu einer Erhöhung des gesamten Pufferbestandes führen.

Mit Hilfe dieser Diagrammen wird ersichtlich, bei welcher Reihenfolge der Bestand am geringsten bleibt. Der geringste Bestand erweist sich, wenn die Reihenfolge der Varianten bei Prozess 1 gleich wie die Reihenfolge bei Prozess 2 ist, nämlich wenn $ABC = A`B`C`$ ist.

6.4.1 Ausblick Szenario 4

Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass die Diagramme am wenigsten Bestand aufweisen, bei denen die Losgröße von Prozess 2 größer als die von Prozess 1 sind. So wird daraus diese Aussage abgeleitet:

Wenn man bei Szenario 4 am Prozess 2 Losgrößen produziert, die größer sind als bei Prozess 1, dann wird sich weniger Bestand zwischen den Prozessen bilden, was wünschenswerter für die Produktion ist.

Der geringste Bestand erweist sich, wenn die Reihenfolge der Varianten bei Prozess 1 gleich wie die Reihenfolge bei Prozess 2 ist, nämlich wenn $ABC = A`B`C`$ ist.

7 Zusammenfassung / Ausblick

Jegliche Art von Gestaltungsmaßnahmen ist aufgrund der Dynamik der Veränderungen und der Vielfalt der externen und internen Einflußfaktoren nur schwer beherrschbar. So entsteht das Dilemma der Ablaufplanung, wobei die logistische Zielgrößen gegenläufig sind. Um eine hohe Auslastung zu erreichen, werden große Pufferbestände benötigt, welche ihrerseits wiederum zu langen Durchlaufzeiten und damit zu einer Verschlechterung der Flexibilität führen. Erschwerend kommt hinzu, dass Veränderungen im Unternehmensumfeld die Gewichtung zwischen beispielsweise Durchlaufzeit oder Bestände stark verschieben können.

Mit Hilfe der Kenntnis der wechselseitigen Abhängigkeiten der logistischen Zielgrößen untereinander und deren Beeinflussungsmöglichkeiten kann die Ablaufplanung beherrschbar gemacht werden. Aufgrund der Vielfalt der Prozesse und Abläufe sowie interner und externer Einflußfaktoren sind diese Zusammenhänge nicht eindeutig zu beschreiben. Hierzu gilt es geeignete Modelle zu finden, welche eine zielgerichtete Gestaltung und Lenkung der Produktion ermöglichen. Zu diesem Zweck werden die logistischen Zielgrößen in Form von Produktionskennlinien dargestellt. Mit denen werden die Abhängigkeiten der Zielgrößen untereinander quantitativ beschrieben und somit eine logistische Positionierung im genannten Spannungsfeld ermöglicht.

Die Kennlinientheorie als deduktiv-experimenteller Modellansatz ist ein alternativer, in der Praxis bereits vielfach bewährter Lösungsansatz. Diese stellt die Abhängigkeiten zwischen den logistischen Zielgrößen des Produktionsprozesses und deren Beeinflussungsmöglichkeiten mit Hilfe mathematischer Modelle dar.

Ein Vorteil der Kennlinientheorie ist die Parametrisierung, welche es dem Modell in weiten Bereichen ermöglicht, sich an verändernde Bedingungen dynamisch anzupassen. Die Modellstruktur und –parameter werden fast zur Gänze aus elementaren Gesetzmäßigkeiten abgeleitet. So können elementare Zusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen unabhängig von einem speziellen Einzelfall beschrieben werden.

Ein Nachteil der Kennlinientheorie ist die Beschränkung auf die Arbeitssystemseite. Um den Durchlauf der Aufträge durch die Produktion unter logistischen Aspekten zu beschreiben, ist daher eine Kombination dieser Modellierungsansätze, Simulation, Warteschlangentheorie und Kennlinientheorie mit anderen Methoden erforderlich. Eine derartige Kombination der erwähnten Ansätze stellt die Engpassorientierte Logistikanalyse dar, bei welcher die Kennlinientheorie in Verbindung mit einer Materialflussanalyse sowie einer Durchlaufzeit- und Bestandsanalyse zum Einsatz kommt. Diese Analysemethode zeigt Möglichkeiten auf, wie sich der

Produktionsablauf transparenter darstellen lässt, sich logistische Engpässe im Materialfluss verhindern lassen und eine Bewertung zur Auswirkung auf das Lieferantenverhalten ermitteln lässt.

Die vorgestellten Anwendungsmöglichkeiten der Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinien zeigen, dass es mit der Kennlinientheorie gelingt, das Dilemma der Ablaufplanung qualitativ und quantitativ auch unter Berücksichtigung betriebsspezifischer Rahmenbedingungen zu beschreiben und somit Produktionsabläufe zielgerichtet beeinflusst werden können.

Im praktischen Teil dieser Arbeit hat es sich gezeigt, dass unter den ersten drei Szenarien das Szenario 2 die größten Vorteile gegenüber den Konkurrenten aufweist. Man erkennt dies durch den Vergleich der Flächen der Pufferbestände, indem man versucht, die kleinst mögliche Fläche zu bestimmen. Bei dieser Szenario beginnt der zweite Prozess einer Variante mit dem Produzieren, ohne zu warten, dass der erste Prozess dieser Variante dieses Produktionsziel erreicht hat. (d.h. A` beginnt zu produzieren, ohne darauf zu warten, dass A sein Produktionsziel erreicht. Wenn A sein Produktionsziel erreicht und B mit dem Produzieren beginnt und aber A` sein Produktionsziel noch nicht erreicht hat, darf trotzdem B` mit dem Produzieren beginnen, ohne auf A´ zu warten.)

Aus Sicht der Losgrößen ist ersichtlich, dass bei jedem Szenario, unabhängig von der Produktionsart, die Bestände am geringsten sind, wenn die Losgröße vom zweiten Produktionsschritt größer ist als jene vom ersten Produktionsschritt. Die Reihenfolge der Produktion verschiedener Varianten ist ebenfalls ein Vergleichskriterium. Wie aus den Diagrammen hervorgeht, ergeben sich die besten Produktionsbedingungen, wenn die Produktionsreihenfolge in beiden Produktionsschritten gleich beibehalten wird. Wenn man alle vier Szenarien untereinander vergleicht, ergibt Szenario 2 c) (und 4 c) mit der Reihenfolge A`-B`-C`) die besten Resultate, wobei die Losgröße vom zweiten Produktionsschritt größer ist als jene vom ersten Produktionsschritt.

8 Quellenverzeichnis

8.1 Literaturquellen

- Burkhalter, 2010
Burkhalter, J.P. (2010). Steuerungs- und Regelungsstrategien für produktionstechnische Systeme. ETH Zurich, Dissertation
- Elers, 2001
Elers, J. (2001). Überprüfung der Einsatzmöglichkeit von Produktionskennlinien als Instrument des Produktions-Controlling bei Wertstromoptimierten Fertigungen. Fachhochschule Hamburg. Diplomarbeit
- Erlach, 2010
Erlach, K. (2010). Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer Verlag. Berlin Heidelberg
- Fischer/Busse, 2006
Fischer, A. ; Busse, T. (2006). Institut für Fabrikanlagen und Logistik. Vortrag Wedemark, 27.09.2006.
Losgrößenverfahren- Die optimale Losgröße im Spannungsfeld zwischen Rüstzeiten und Beständen.
- Kerner, 2002
Kerner, A. (2002). Modellbasierte Beurteilung der Logistikleistung von Prozessketten. Universität Hannover. Dissertation
- Lödding, 2008
Lödding, H. (2008). Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2., erweiterte Auflage. Springer Verlag. Berlin Heidelberg.
- Nyhuis, 2008
Nyhuis, P. (2008). (Hrsg.) Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Springer Verlag. Berlin Heidelberg
- Nyhuis/Wiendahl, 1999
Nyhuis, P.; Wiendahl, H-P. (1999). Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Springer

- Verlag, Berlin Heidelberg.
- Nyhuis/Wiendahl, 2012 Nyhuis, P.; Wiendahl, H-P. (2012). Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 3. Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Reinsch, 2003 Reinsch, S. (2003). Kennzahlenbasierte Positionierung der Logistik von Lieferketten. Universität Hannover. Dissertation
- Rommel, 1995 Rommel, G. (1995). Qualität gewinnt – Mit Hochleistungskultur und Kundennutzen an die Weltspitze. McKinsey&Company Inc. Schäffer-Poeschel Verlag. Stuttgart
- Weber, 1995 Weber, J. (1995). Logistik-Controlling. 4. Auflage. Schäffer-Poeschel Verlag. Stuttgart
- Wiendahl, 1997 Wiendahl, H-P. (1997). Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Carl Hanser Verlag, München Wien.
- Wiendahl, 2002 Wiendahl, H-P. (2002). Erfolgsfaktor Logistikqualität: Vorgehen, Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung der Logistikleistung. Zweite Auflage. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg.
- Wiendahl/Nyhuis/Fischer/Grabe, 2006 Wiendahl, H-P.; Nyhuis, P.; Fischer, A.; Grabe, D. (2006) Controlling in Lieferketten in Produktionsplanung und –steuerung, Günther Schuh. Springer Verlag
- Wiendahl, 2010 Wiendahl, H-P. (2010). Betriebsorganisation für Ingenieure. 7., aktualisierte Auflage. Carl Hanser Verlag. München

8.2 Internetquellen

VNL, 2006

http://www.vnl.at/fileadmin/medien/vnl/7._Mitgliederbereich/Praesentationen/Supply_Chain_Forum/2006/Praesentation_Schitter_Partner.pdf

Fischer/Busse, 2006

<http://www.moehwald-unternehmensberatung.de/losgroessenverfahren.pdf>

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zielsystem der PPS.....	6
Abbildung 2: Gewichtsverschiebung bei den Zielgrößen der Fertigungssteuerung.....	7
Abbildung 3: Gewichtung logistischer Zielgrößen bei unterschiedlichen Bevorratungsstrategien	8
Abbildung 4: Dilemma der Ablaufplanung mit Produktionskennlinien.....	9
Abbildung 5: Der Fehlerkreis der Fertigungssteuerung	10
Abbildung 6: Ein Modell zur Fertigungssteuerung	11
Abbildung 7: Trichtermodell und das Durchlaufdiagramm	14
Abbildung 8: Prinzipielles Durchlaufdiagramm eines Arbeitssystems	15
Abbildung 9: Bestand, Reichweite und Leistung im Durchlaufdiagramm	16
Abbildung 10: Darstellung von Durchlaufelementen im Durchlaufdiagramm.....	22
Abbildung 11: Gegenüberstellung zentraler Durchlaufzeitkennwerte an einem Arbeitssystem.....	24
Abbildung 12: Gegenüberstellung der Trichterformel und Little`s Law	27
Abbildung 13: Zielgrößen in einer logistischen Lieferkette	28
Abbildung 14: Zielkreuz der produktionslogistischen Zielgrößen.....	29
Abbildung 15: Zielgrößen der Logistikleistung und der Logistikkosten	30
Abbildung 16: Lieferterminabweichung	33
Abbildung 17: Liefertreue, Liefertermineinhaltung und Lieferbereitschaftsgrad.....	35
Abbildung 18: Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente	36
Abbildung 19: Definition der Terminabweichungsgrößen	38
Abbildung 20: Einfluss der Auslastung auf den Absatz eines Unternehmens	40
Abbildung 21: Vergleichende Bewertung alternativer Modellierungsansätze zur Erstellung von Produktionskennlinien.....	43
Abbildung 22: Prinzipbeispiele für Durchlaufdiagramme	45
Abbildung 23: Produktionskennlinien	47
Abbildung 24: Ableitung idealer Produktionskennlinien aus dem idealen Durchlaufdiagramm	50
Abbildung 25: Der Verlauf der idealen und realen Leistungs- und Reichweitenkennlinie.....	52
Abbildung 26: Darstellung eines idealen Fertigungsprozesses im Durchlaufdiagramm	54
Abbildung 27: Der ideale Fertigungsablauf bei Berücksichtigung von Transportvorgängen	56
Abbildung 28: Abgrenzung der Begriffe Kapazität und maximal mögliche Leistung..	58
Abbildung 29: Konstruktion idealer Leistungs- und Zeitgrößenkennlinien	59
Abbildung 30: Gegenüberstellung von idealen und simulierten Leistungskennlinien	61
Abbildung 31: Bestandteile der Leistungskennlinie	63

Abbildung 32: Darstellung der mathematischen Zusammenhänge für ausgewählte Kenngrößen.....	65
Abbildung 33: Einfluss von Reihenfolgevertauschungen bei unterschiedlichen Warteschlangen	67
Abbildung 34: Kennlinien der Durchlaufzeit bei unterschiedlichen Reihenfolgeregeln	69
Abbildung 35: Normierte Produktionskennlinien.....	71
Abbildung 36: Normierte Produktionskennlinien mit ungewichteten Kenngrößen	73
Abbildung 37: Entwicklung des Lager-Durchlaufdiagramms aus dem allgemeinen Lagermodell.....	76
Abbildung 38: Durchlaufdiagramm eines Beschaffungs- und Lagerhaltungsprozesses	77
Abbildung 39: Das Lager-Durchlaufdiagramm.....	77
Abbildung 40: Ableitung der Kennlinie aus dem Lager-Durchlaufdiagramm	78
Abbildung 41: Das Lagermodell als Basis der idealen Lagerkennlinie	80
Abbildung 42: Einflussgrößen auf reale Lagerkennlinien	84
Abbildung 43: Schritte zur Absenkung von Durchlaufzeit und Bestand in der Produktion	85
Abbildung 44: Parameter approximierter Leistungskennlinien.....	87
Abbildung 45: Parameter berechneter Lagerkennlinien	90
Abbildung 46: Logistische Positionierung mit Produktionskennlinien	91
Abbildung 47: Prinzipieller Verlauf der Prozess- und Bestandskosten des Produktionsprozesses in Abhängigkeit vom Bestand.....	93
Abbildung 48: Prinzipieller Verlauf von Leistung, Durchlaufzeit und Kosten eines Arbeitsplatzes abhängig vom Bestand	94
Abbildung 49: Einfluss der Kostenstruktur auf den kostenminimalen Betriebsbereich	95
Abbildung 50: Der Controlling-Regelkreis	96
Abbildung 51: Engpaßorientierte Logistikanalyse.....	97
Abbildung 52: Losgrößenbestimmung nach Andler.....	99
Abbildung 53: Entwicklung des Lagerbestands im klassischen Losgrößenformel... ..	100
Abbildung 54: Das Prinzip der Durchlauforientierten Losgrößenbestimmung	101
Abbildung 55: Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung.....	102
Abbildung 56: Andler`sche Losgrößenformel & Durchlauforientierte Losgrößenformel	103
Abbildung 57: Darstellung des Kundentaktes bei den Produktionskennlinien	104
Abbildung 58: Szenario 1 "Losgröße 1 = Losgröße 2".....	108
Abbildung 59: Szenario 1 "Losgröße 1 = Losgröße 2".....	109
Abbildung 60: Szenario 1 "Losgröße 1 = Losgröße 2".....	110
Abbildung 61: Szenario 1 "Losgröße 1 = Losgröße 2".....	111
Abbildung 62: Szenario 1 "Losgröße 1 > Losgröße 2".....	113

Abbildung 63: Szenario 1 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	114
Abbildung 64: Szenario 1 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	115
Abbildung 65: Szenario 1 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	116
Abbildung 66: Szenario 1 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	118
Abbildung 67: Szenario 1 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	119
Abbildung 68: Szenario 1 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	120
Abbildung 69: Szenario 1 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	121
Abbildung 70: Szenario 2 "Losgröße 1 = Losgröße 2"	123
Abbildung 71: Szenario 2 "Losgröße 1 = Losgröße 2"	124
Abbildung 72: Szenario 2 "Losgröße 1 = Losgröße 2"	125
Abbildung 73: Szenario 2 "Losgröße 1 = Losgröße 2"	126
Abbildung 74: Szenario 2 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	128
Abbildung 75: Szenario 2 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	129
Abbildung 76: Szenario 2 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	130
Abbildung 77: Szenario 2 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	131
Abbildung 78: Szenario 2 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	133
Abbildung 79: Szenario 2 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	134
Abbildung 80: Szenario 2 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	135
Abbildung 81: Szenario 2 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	136
Abbildung 82: Szenario 3 "Losgröße 1 = Losgröße 2"	138
Abbildung 83: Szenario 3 "Losgröße 1 = Losgröße 2"	139
Abbildung 84: Szenario 3 "Losgröße 1 = Losgröße 2"	140
Abbildung 85: Szenario 3 "Losgröße 1 = Losgröße 2"	141
Abbildung 86: Szenario 3 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	143
Abbildung 87: Szenario 3 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	144
Abbildung 88: Szenario 3 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	145
Abbildung 89: Szenario 3 "Losgröße 1 > Losgröße 2"	146
Abbildung 90: Szenario 3 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	148
Abbildung 91: Szenario 3 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	149
Abbildung 92: Szenario 3 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	150
Abbildung 93: Szenario 3 "Losgröße 2 > Losgröße 1"	151
Abbildung 94: Szenario 4 ABC "Losgröße 1= Losgröße 2"	153
Abbildung 95: Szenario 4 CAB "Losgröße 1= Losgröße 2"	154
Abbildung 96: Szenario 4 BCA "Losgröße 1= Losgröße 2"	155
Abbildung 97: Szenario 4 BAC "Losgröße 1= Losgröße 2"	156
Abbildung 98: Szenario 4 ABC "Losgröße 1 > Losgröße 2"	159
Abbildung 99: Szenario 4 CAB "Losgröße 1 > Losgröße 2"	160
Abbildung 100: Szenario 4 BCA "Losgröße 1 > Losgröße 2"	161
Abbildung 101: Szenario 4 BAC "Losgröße 1 > Losgröße 2"	162
Abbildung 102: Szenario 4 ABC "Losgröße 2 > Losgröße 1"	165
Abbildung 103: Szenario 4 CAB "Losgröße 2 > Losgröße 1"	166

Abbildung 104: Szenario 4 BCA "Losgröße 2 > Losgröße 1"	167
Abbildung 105: Szenario 4 BAC "Losgröße 2 > Losgröße 1"	168

10 Formelverzeichnis

(2.1) Mittlere Leistung.....	16
(2.2) Auftragszeit eines Arbeitsvorganges.....	17
(2.3) Mittlere Reichweite.....	17
(2.4) Mittlere Auftragszeit	18
(2.5) Standardabweichung der Auftragszeit	18
(2.6) Variationskoeffizient der Auftragszeit.....	18
(2.7) Durchführungszeit.....	19
(2.8) Mittlere Auslastung	19
(2.9) Mittlerer Bestand.....	20
(2.10) Mittlerer Bestand.....	20
(2.11) Mittlere Reichweite als Trichterformel	21
(2.12) Mittlere gewichtete Durchlaufzeit	22
(2.13) Mittlere Reichweite.....	23
(2.14) Mittlere Durchlaufzeit	24
(2.15) Mittlere Leistung einer Arbeitsstation	25
(2.16) Mittlere Durchlaufzeit	25
(2.17) Virtuelle Durchlaufzeit	26
(2.18) Mittlere Leistung.....	26
(2.19) Mittlere virtuelle Durchlaufzeit	26
(3.1) Lieferzeit	32
(3.2) Lieferterminabweichung.....	32
(3.3) Lieferterminabweichung.....	33
(3.4) Liefertreue.....	34
(3.5) Liefertermineinhaltung.....	34
(3.6) Lieferbereitschaftsgrad.....	35
(3.7) Servicegrad.....	36
(3.8) Durchlaufzeit.....	37
(3.9) Abgangsterminabweichung.....	37
(3.10) Zugangsterminabweichung	38
(3.11) Relative Terminabweichung.....	39
(3.12) Termintreue.....	39
(4.1) Idealer Mindestbestand.....	55
(4.2) Idealer Mindestbestand.....	55
(4.3) Idealer Mindestbestand.....	56
(4.4) Idealer Mindestbestand.....	56
(4.5) Maximal mögliche Leistung.....	57
(4.6) Mindestreichweite	59
(4.7) Mindestreichweite	60

(4.8) Mindestdurchlaufzeit	60
(4.9) Mindestübergangszahl	60
(4.10) Mittlerer Bestand & Mittlere Leistung	62
(4.11) Mittlere bestandsabhängige Auslastung	63
(4.12) Mittlerer Bestand	64
(4.13) Mittlerer Bestand bei Auftragsbearbeitung	64
(4.14) Mittlerer Pufferbestand	64
(4.15) Mittlere Reichweite	65
(4.16) Mittlere Durchlaufzeit	66
(4.17) Mittlere Übergangszeit	66
(4.18) Mittlere Liegezeit bei Anwendung von FIFO-Regel	67
(4.19) Mittlere Liegezeit bei Anwendung von LOZ-Regel	67
(4.20) Mittlere Liegezeit bei Anwendung von KOZ-Regel	67
(4.21) Mittlere Durchlaufzeit bei Anwendung von LOZ-Regel	68
(4.22) Mittlere Durchlaufzeit bei Anwendung von KOZ-Regel	68
(4.23) Mittlerer relativer Bestand	69
(4.24) Mittlerer relativer Bestand & mittlere bestandsabhängige Auslastung	70
(4.25) Mittlerer gewichteter Flussgrad	71
(4.26) Mittlerer ungewichteter Flussgrad	72
(4.27) Mittlerer ungewichteter Flussgrad	72
(4.28) Mittlerer Lieferverzug im Lagerabgang	80
(4.29) Losbestand	81
(4.30) Minimaler Grenzlieferrung	81
(4.31) Praktisch minimaler Grenzbestand	82
(4.32) Praktisch minimaler Grenzlieferrungsverzug	83
(4.33) Mittlerer Losbestand & mittlerer Lieferverzug	83
(5.1) Gesamtkosten im Dispositionszeitraum	98
(5.2) Losgröße nach Andler	98
(5.3) Losgröße nach durchlauforientierten Losgrößenbestimmung	102
(5.4) Kundentakteinhaltung	104
(5.5) Kundentakteinhaltung	105
(5.6) EPEI-Wert	105

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Logistische Zielgrößen für die Referenzprozesse der Produktion	29
Tabelle 2: Einsatzmöglichkeiten von Produktionskennlinien bei der Gestaltung und Lenkung von Produktionsprozessen	86

12 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	das heißt
etc.	et cetera
lt.	laut
o.g.	oben genannt
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel