

Masterarbeit

**Analyse der Bedarfssituation und der
damit verbundenen Auslastungs-,
Durchlaufzeit- und Bestandsentwick-
lung bei SIG Combibloc**

eingereicht an der

Montanuniversität Leoben

erstellt am

Lehrstuhl Industrielogistik

Vorgelegt von:
Daniel MÖSCHL
0411390

Betreuer/Gutachter:
Dipl.-Ing. Georg Judmaier
Univ.-Prof. Dr. Helmut Zsifkovits

Leoben, 04.03.2012

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Daniel Möschl

Leoben, 04.03.2012

Kurzfassung

Die erfolgreiche Ausrichtung eines Unternehmens auf die Anforderungen des globalen Wettbewerbs bedarf eines Kompromisses zwischen verschiedenen, teils widersprüchlichen Zielen. Die Bildung von Zielwerten bezüglich dieser sogenannten produktionslogistischen Zielgrößen ist eine wesentliche Aufgabe der logistischen Positionierung eines Betriebs.

Das Unternehmen SIG Combibloc will dessen Kunden eine Lieferzeit von maximal drei Wochen garantieren, dazu soll der maximal mögliche Auslastungsgrad der Produktion ermittelt werden. Wird dieser Auslastungsgrad über eine längere Zeitspanne überschritten, muss eine bestimmte Menge an Fertigware bereitgehalten werden, um die Lieferzeit trotzdem einhalten zu können.

Zur Analyse der Voraussetzungen und Auswirkungen dieses Ziels können verschiedene Methoden herangezogen werden, eine Beschreibung sowie eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile einer Auswahl der möglichen Methoden bilden die theoretische Grundlage der vorliegenden Arbeit.

Nach Bewertung der beschriebenen Methoden wird die Problemstellung von SIG Combibloc schließlich mit Hilfe der sogenannten Kennlinientheorie bearbeitet. Neben den Zielwerten zur Erreichung der gewünschten Lieferzeit wird auch die Vorgehensweise zur Berechnung des Fertigwarenbestandes dargelegt, der aufgebaut werden muss, wenn die berechneten Zielwerte aus diversen Gründen nicht eingehalten werden können.

Abstract

In order to achieve a successful orientation of a company towards the requirements of global competition, a compromise between different, often conflicting goals is required. Defining target values is one of the main tasks of a company's positioning regarding logistics.

The company SIG Combibloc wants to guarantee their customers a maximum delivery time of three weeks, the maximum production utilization in order to fulfill this goal should be estimated. Additionally, if the utilization rate is higher than the calculated maximum rate over a certain period of time, a specific amount of finished goods is needed in order to deliver on time.

Various methods can be used to analyze the requirements and impacts of these goals, the descriptions and a comparison of methods form the theoretical basis of this thesis.

After evaluating the methods and choosing the most suitable one, the logistics operating curves approach is used. In addition to finding target values to achieve the maximum delivery time of three weeks, the amount of finished goods is calculated, which has to be stored to be able to deliver on time even if the production utilization is higher than aimed.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Kurzfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.2 Eingrenzungen	2
1.3 Produkte und Produktionsprozesse von SIG Combibloc	3
1.3.1 Extrusion.....	5
1.3.2 Druck.....	5
1.3.3 Stanzen.....	5
1.3.4 Falten und Siegeln	5
2 Produktionslogistische Zielgrößen	6
2.1 Durchlaufzeit	7
2.2 Bestand.....	8
2.3 Liefertermintreue	9
2.4 Kapazitätsauslastung.....	9
2.5 Zusammenfassung	11
3 Analysemöglichkeiten	12
3.1 Modellierung	12
3.2 Kennlinientheorie.....	14
3.2.1 Durchlaufdiagramm	15
3.2.2 Produktionskennlinien.....	17
3.2.3 Umsetzung	21
3.2.4 Anwendung auf die Problemstellung von SIG Combibloc	23
3.3 Simulation.....	24
3.3.1 Simulationsmethoden.....	25
3.3.2 Ereignisorientierte Simulation	26
3.3.3 Umsetzung	28
3.3.4 Anwendung auf die Problemstellung von SIG Combibloc	29
3.4 Warteschlangentheorie	29
3.4.1 Notation von Wartesystemen.....	31
3.4.2 Das M M 1 - Modell	31
3.4.3 Umsetzung	33
3.4.4 Anwendung auf die Problemstellung von SIG Combibloc	34
3.5 Methodenauswahl.....	35
4 Anwendung der Kennlinientheorie auf die Problemstellung von SIG Combibloc	39
4.1 Vorgangsweise	39
4.2 Datenerhebung.....	42
4.3 Datenauswertung	43
4.4 Erstellung der Durchlaufdiagramme	46
4.5 Erstellung der Produktionskennlinien.....	49
4.6 Überprüfung der Vorgehensweise	54
4.6.1 Überprüfung der Produktionskennlinien	54

4.6.2	Überprüfung der Betrachtung der Fertigungsstufe Endfertigung.....	56
4.7	Zielwerte	58
4.7.1	Bestandsgrenzwerte zur Einhaltung der Lieferzeit.....	59
4.7.2	Günstiger Betriebszustand	61
4.7.3	Gegenüberstellung.....	62
4.8	Berechnung Fertigwarenbestand.....	64
5	Zusammenfassung und Ausblick	67
	Literaturverzeichnis	69

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Beurteilung der Analysemöglichkeiten	36
Tabelle 2: Nutzwertanalyse SIG Combibloc	38
Tabelle 3: Werke und Formate	39
Tabelle 4: Größeneinteilung Werk A	44
Tabelle 5: Größeneinteilung Werk B	45
Tabelle 6: Größeneinteilung Werk C	45
Tabelle 7: Daten zur Erstellung der Produktionskennlinien Werk A.....	50
Tabelle 8: Daten zur Erstellung der Produktionskennlinien Werk B	52
Tabelle 9: Daten zur Erstellung der Produktionskennlinien Werk C.....	53
Tabelle 10: Gegenüberstellung Bestandsszenarien Werk A	63
Tabelle 11: Gegenüberstellung Bestandsszenarien Werk B.....	63
Tabelle 12: Umrechnung Vorgabestunden in Stück Werk A.....	64
Tabelle 13: Umrechnung Vorgabestunden in Stück Werk B.....	65
Tabelle 14: Berechnung Fertigwarenbestand Werk A.....	66
Abbildung 1: Produkte von SIG Combibloc	4
Abbildung 2: Herstellungsprozess	4
Abbildung 3: Fehlerkreis der Produktionssteuerung	7
Abbildung 4: Gliederung der Durchlaufzeit bei SIG Combibloc.....	8
Abbildung 5: Verlustzeiten	10
Abbildung 6: Ablauf der Arbeit mit Modellen.....	12
Abbildung 7: Durchlaufdiagramm	15
Abbildung 8: Produktionskennlinien.....	17
Abbildung 9: Parameter der Produktionskennlinien	20
Abbildung 10: Zeitdarstellung der verschiedenen Simulationsmethoden	26
Abbildung 11: Ablauf der ereignisgesteuerten Simulation.....	27
Abbildung 12: Wartesystem.....	30
Abbildung 13: Markov-Kette eines M M 1 Modells.....	32
Abbildung 14: Vorgehensweise	41
Abbildung 15: Durchlaufdiagramm Werk A	47
Abbildung 16: Durchlaufdiagramm Werk B	48
Abbildung 17: Durchlaufdiagramm Werk C.....	49
Abbildung 18: Kennlinien Werk A	51
Abbildung 19: Kennlinien Werk B.....	52
Abbildung 20: Kennlinien Werk C	53
Abbildung 21: Überprüfung Durchlaufzeitkennlinie Werk A.....	54

Abbildung 22: Überprüfung Durchlaufzeitkennlinie Werk B.....	55
Abbildung 23: Überprüfung Durchlaufzeitkennlinie Werk C.....	56
Abbildung 24: Durchlaufzeit gesamt und Durchlaufzeit Endfertigung Werk A	57
Abbildung 25: Durchlaufzeit gesamt und Durchlaufzeit Endfertigung Werk B.....	58
Abbildung 26: Maximalbestand Werk A	59
Abbildung 27: Maximalbestand Werk B.....	60
Abbildung 28: Betriebszustand Werk A.....	61
Abbildung 29: Betriebszustand Werk B	62

1 Einleitung

„Der Kunde ist König“ behauptet ein Leitsatz der Betriebswirtschaft, der neben dem Handel auch für Industrieunternehmen gilt. Im globalen Wettbewerb versuchen Unternehmen einen hohen Grad an Kundenzufriedenheit zu erreichen, um eine möglichst hohe Bindung des Kunden an das Unternehmen bzw. das Produkt zu erzielen und zu sichern. Dafür ist die Logistikleistung ein wichtiger Aspekt, da sie direkt vom Kunden wahrgenommen wird. Die Beurteilung der Logistikleistung erfolgt über verschiedene Kennzahlen, unter anderem über Lieferzeit, Liefertermintreue und Lieferflexibilität.

Die Lieferzeit definiert die Zeitspanne von Auftragseingang bis zur Lieferung der gefertigten Ware an den Kunden.¹ Die Termintreue einer Lieferung bezeichnet den Grad der Einhaltung zwischen zugesagtem und tatsächlichem Liefertermin, während die Lieferflexibilität den Zusammenhang zwischen gewünschten und ausgeführten Änderungswünschen eines Auftrags darstellt.²

Die Logistikleistung ist zwar für die Kundenzufriedenheit ein wichtiger Kennwert, ein Unternehmen der Privatwirtschaft muss aber vor allem wirtschaftlich handeln. Bestände und Durchlaufzeiten sollen aus diesem Grund niedrig gehalten werden, die verfügbaren Kapazitäten möglichst hoch und gleichmäßig ausgelastet sein.

Produktions- und Kapazitätsplanung sollen die Erreichung der optimalen Ausprägungen dieser Werte ermöglichen. Für die termingerechte Platzierung der Aufträge ist die Kenntnis der Auswirkung auf Auslastung und Durchlaufzeit wichtig, um eine entsprechende Logistikleistung und somit Kundenzufriedenheit zu erreichen.

In weiterer Folge sind prognostizierte Werte für Bestand, Auslastung und Durchlaufzeit ein wichtiger Einflussfaktor für Kapazitätsanpassungen, sei es bezogen auf Personal oder auf Anlagen.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Das Unternehmen SIG Combibloc stellt Einwegflüssigkeitsverpackungen aus Karton und Füllmaschinen für Getränke und Lebensmittel her. Die Packungen werden je nach Form und Größe in Formate und Volumina eingeteilt. Außerdem gibt es ver-

¹ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 8

² Vgl. Disselkamp/Schüller (2004), S. 135 ff.

schiedene Öffnungshilfen, also zum Beispiel Perforationen oder Drehverschlüsse. Die Kartonverpackungen werden zu den Kunden in Form von sogenannten Mänteln geliefert und dort mit Hilfe einer Füllmaschine aufgeformt, befüllt und versiegelt.

Für diese Mäntel will SIG Combibloc ihren Kunden eine Lieferzeit von maximal drei Wochen bieten, die Lieferzeit für Aluminium, das in vielen Produkten von SIG in Form einer hauchdünnen Schicht mit Polyethylen (PE) zur Beschichtung des Kartons verwendet wird, beträgt aber im Schnitt drei Monate. Die benötigten Sorten Aluminium müssen daher schon einige Zeit vor Einlangen des Kundenauftrags bestellt werden. Bedarfsprognosen, sogenannte Forecasts, erstellt unter anderem aus Vergangenheitswerten, werden dafür verwendet.

Verschiedene Bedarfsprognosen haben unterschiedliche Auslastungsgrade der vorhandenen Kapazität zur Folge, daher stellt sich für SIG Combibloc die Frage, wie sich der Zusammenhang zwischen Kapazitätsauslastung und Lieferzeit abbilden lässt. Welche Methoden können einerseits im Allgemeinen und speziell bei SIG Combibloc verwendet werden, um diesen Zusammenhang aufzuzeigen?

Da SIG Combibloc, wie bereits erwähnt, ihren Kunden eine Lieferzeit von drei Wochen bieten möchte, stellt sich außerdem die Frage, wie hoch der Auslastungsgrad der Kapazität maximal sein darf, um diese drei Wochen immer einhalten zu können. Falls dieser Grenzwert der Auslastung aber doch überschritten wird, soll ermittelt werden, wie viel Bestand an Fertigware bestimmter Produkte auf Lager sein müsste, um die Lieferzeit trotzdem einhalten zu können.

Probleme ergeben sich unter anderem aus saisonalen Schwankungen des Bedarfs oder Druckdekorwechseln, welche zur Folge haben, dass der bereits bedruckte Bestand nicht mehr veräußert werden kann.

1.2 Eingrenzungen

Die Zeit der Zustellung vom Produktionswerk zum Kunden wird vereinfachend als konstant angenommen. Außer Acht gelassen werden Überseelieferungen, für den Rest ist diese Annahme weitestgehend korrekt, da mehrere Produktionsstandorte sowohl in Europa als auch in Asien existieren. Relevant für die Aufgabenstellung ist demzufolge die Durchlaufzeit, von Auftragseingang bis zum Fertigwarenlager.

Personell wird ein Schichtmodell über 24 Stunden am Tag und sieben Tage die Woche angenommen, um Änderungen an der Personalkapazität vernachlässigen zu

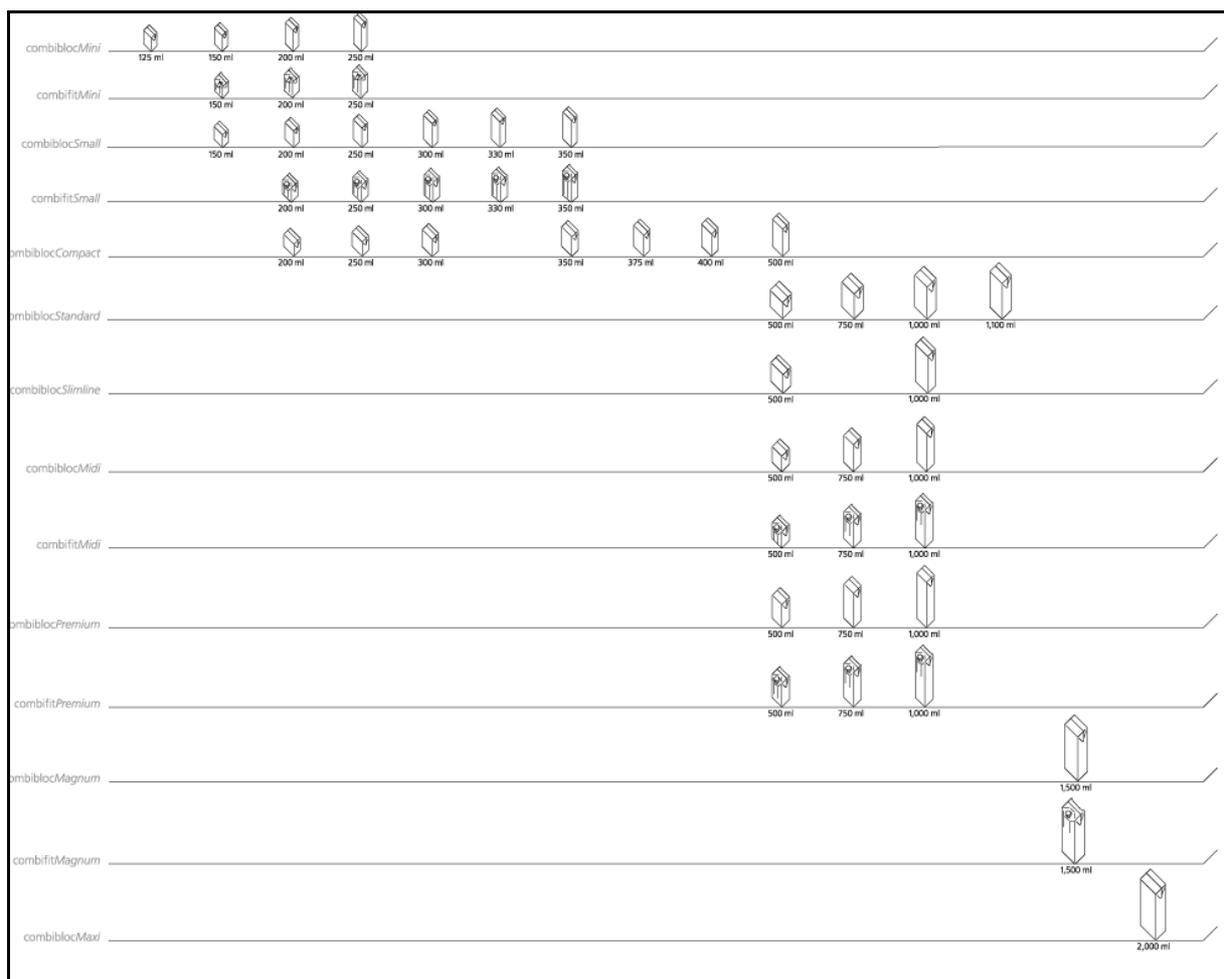
können. Die Optimierung von Losgrößen oder Produktionsblöcken ist ebenfalls nicht Ziel der Arbeit.

Weiters wird sich die Analyse auf ausgewählte Formate und Produktionslinien konzentrieren, welche für SIG Combibloc von besonderem Interesse sind. Die unterschiedlichen Volumina der Getränkekartons können ebenfalls vernachlässigt werden, da der produzierte Mix je Format größtenteils gleich bleibt.

1.3 Produkte und Produktionsprozesse von SIG Combibloc

SIG Combibloc stellt, wie bereits erwähnt, Einwegflüssigkeitsverpackungen aus Karton und Füllmaschinen für Getränke und Lebensmittel her. Das Unternehmen ist in die neuseeländische Rank Group eingegliedert und beschäftigt mehr als 4.650 Mitarbeiter in mehr als 40 Ländern.³

Folgende Abbildung zeigt die derzeit von SIG Combibloc angebotenen Kartonverpackungen.



³ Vgl. SIG Combibloc (2012)

Abbildung 1: Produkte von SIG Combibloc⁴

Die Herstellung der Produkte läuft immer nach dem gleichen Schema ab, dargestellt in folgender Abbildung.

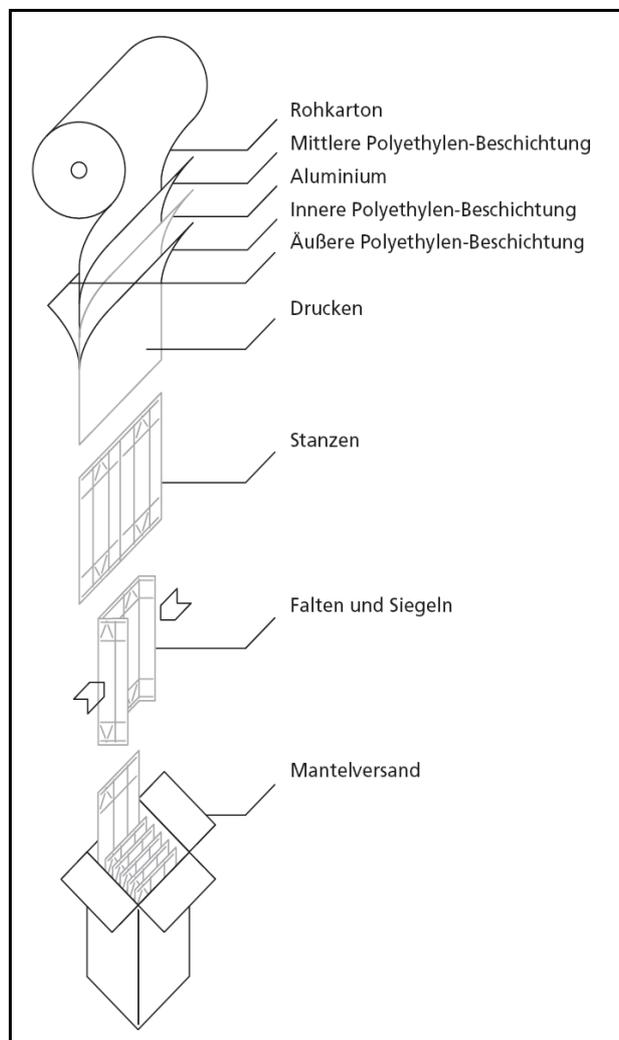


Abbildung 2: Herstellungsprozess⁵

Gefaltete und seitlich gesiegelte Produkte, sogenannte Mäntel, werden versandt, beim Kunden mit Hilfe einer Füllmaschine befüllt und zur Gänze versiegelt. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Produktionsprozesse von SIG Combibloc vorgestellt.

⁴ SIG Combibloc intern

⁵ SIG Combibloc intern

1.3.1 Extrusion

Während der Extrusion oder Beschichtung wird dem Karton, welcher als Rolle über den sogenannten Extruder läuft, eine Schicht flüssiges Polyethylen (PE) aufgetragen. Wenn der Mantel für ein haltbares Produkt verwendet werden soll, folgt zusätzlich eine hauchdünne Schicht Aluminium und dann eine weitere Schicht Polyethylen. Die zusätzliche Schicht PE trägt Sorge, dass das Aluminium mit dem Karton verbunden wird und nicht mit dem Füllgut in Kontakt gerät.

1.3.2 Druck

Im zweiten Prozessschritt wird der beschichtete Karton, genannt HF1, bedruckt. Nach dem Druck weist das Material einen eindeutigen Kundenbezug auf, dieser Schritt ist somit der Kundenentkopplungspunkt.

1.3.3 Stanzen

Nach dem Druck wird das immer noch in Rollenform vorliegende Material nach Mantelfläche des späteren Getränkekartons gestanzt. Außerdem wird das Material mit speziellen Nutlinien für die spätere Faltung versehen.

1.3.4 Falten und Siegeln

In diesem letzten Schritt werden die gestanzten Kartons unterstützt durch die bereits erwähnten Nutlinien in Form gebracht und an der Seitenfläche versiegelt. Die Siegelung muss sehr präzise erfolgen, die unbeschichtete Längsnaht darf nach der Befüllung nicht in Berührung mit dem Füllgut gelangen. Grund- und Deckfläche bleiben weiterhin offen und werden beim Kunden nach der Füllung versiegelt.

Die Prozesse „Stanzen“ und „Falten und Siegeln“ können gemeinsam betrachtet und als „Endfertigung“ bezeichnet werden. Die beiden Schritte laufen direkt nacheinander ab, es wird lediglich ein gewisser Pufferbestand zwischen den Maschinen gesammelt, um die höhere Produktionsgeschwindigkeit des letzten Schritts auszugleichen.

2 Produktionslogistische Zielgrößen

Für die Fertigung können verschiedene Kenngrößen ermittelt werden, nach denen die Produktionsprozesse bewertet werden. Diese sogenannten produktionslogistischen Zielgrößen oder -werte geben Aufschluss über Verbesserungspotentiale seitens Produktionsplanung und -steuerung.

„Die logistischen Ziele der Produktion sind die kürzestmögliche, pünktliche Kundenbelieferung bei niedrigen Beständen und hoher gleichmäßiger Auslastung.“⁶

Bei Außerachtlassung monetärer Aspekte lassen sich daraus folgende Größen ableiten.⁷

- Durchlaufzeit
- Bestand
- Liefertermintreue
- Kapazitätsauslastung

Die Zielgrößen beeinflussen sich gegenseitig und sind teilweise widersprüchlich. Optimale Werte einzelner Faktoren ergeben daher nur Suboptima für das gesamte System, den bestmöglichen Kompromiss zu finden gestaltet sich in der Praxis als schwierig. In der Regel werden Erfahrungswerte verwendet, um Sollgrößen für die benannten Ziele zu bilden. Optimierungsversuche müssen konsequent auf das Gesamtsystem ausgerichtet werden. Wenn Maßnahmen zu stark auf die Optimierung einzelner Zielgrößen abzielen, können negative Auswirkungen auf eine oder mehrere der Übrigen folgen. Als Beispiel hierfür können Liefertermintreue und Bestand herangezogen werden. Maßnahmen, die zu stark auf Bestandsabbau ausgerichtet sind, ziehen oft eine Verschlechterung der Liefertermintreue nach sich und umgekehrt.⁸

Welche Folgen durch falsche Maßnahmen, die aufgrund der schlechten Ausprägung einer Zielgröße gesetzt werden, erzeugt werden können, verdeutlicht Abbildung 3, der sogenannte Fehlerkreis der Produktionssteuerung.

⁶ Klaus/Krieger (2008), S. 230

⁷ Vgl. Schmidt/Schitter (2007), S. 121 f. und Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 11

⁸ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 10

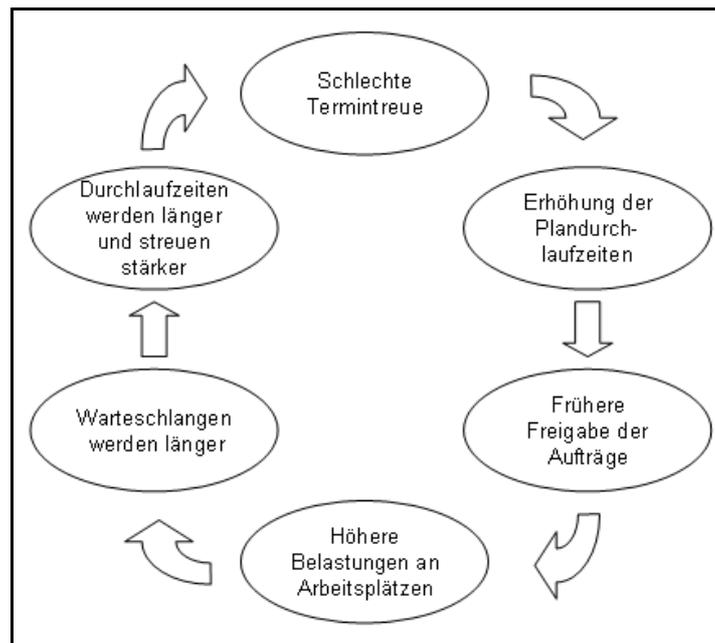


Abbildung 3: Fehlerkreis der Produktionssteuerung⁹

Dieses Verhalten wurde bereits in den 1970er Jahren bekannt, erweist sich jedoch nach wie vor als aktuell.

Um die Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen zu erkennen, werden diese in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

2.1 Durchlaufzeit

Die Zeitspanne vom Start des ersten Arbeitsschrittes bis zum Ende des letzten Schrittes bezeichnet die Durchlaufzeit eines Auftrages. Im weiteren Sinne wird sowohl der Anteil für Materialbeschaffung als auch jener für Konstruktions- und Entwicklungstätigkeiten mit einbezogen und Gesamtdurchlaufzeit genannt. Die Produktionsdurchlaufzeit lässt diese Tätigkeiten außer Acht und kann laut Pawellek in folgende Teilzeiten gegliedert werden:¹⁰

- Bearbeitungszeiten inklusive Rüstzeiten
- Zeiten für Transport zu Anlagen
- Zeiten für Kontrolltätigkeiten
- Liegezeiten vor und hinter Anlagen

⁹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 5

¹⁰ Vgl. Pawellek (2007), S. 33 f.

Bei SIG Combibloc setzt sich die Durchlaufzeit aus den Zeiten der folgenden Tätigkeiten zusammen.

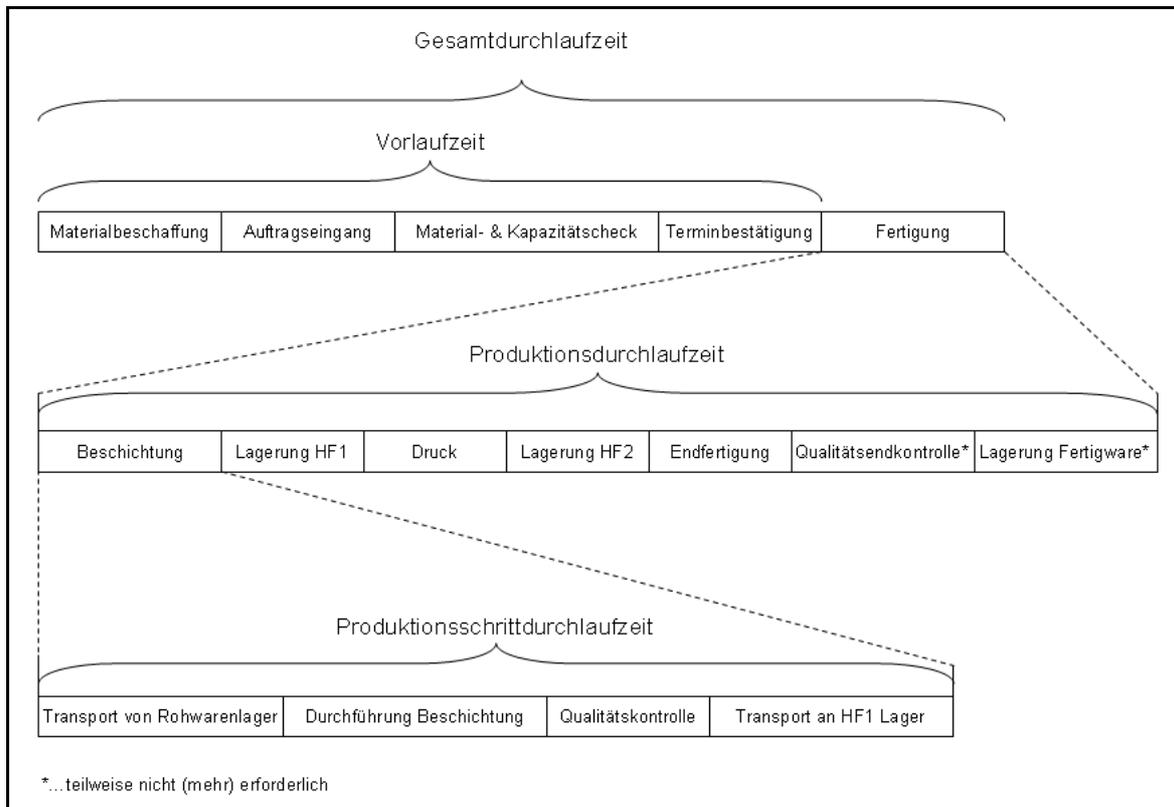


Abbildung 4: Gliederung der Durchlaufzeit bei SIG Combibloc

Die Balkengröße in Abbildung 4 spiegelt nicht die benötigte Zeit für den jeweiligen Prozessschritt wider. Die Abkürzung HF in HF1 und HF2 steht für Halbfabrikat, bezeichnet also eine Zwischenstufe zum Endprodukt. Die Materialbeschaffung muss aufgrund der hohen Lieferzeiten für einige Rohmaterialien schon vor Auftragseingang erfolgen. Einige Sorten des verwendeten Polyethylens könnten auch nach Auftragsingang bestellt werden, diese Sorten werden aber in fast allen Produkten verwendet und daher in ausreichender Menge in Silos bereitgehalten. Die Qualitätskontrolle findet laufend automatisch an den Maschinen statt. Eine Qualitätsendkontrolle wird nur durchgeführt, wenn bestimmte Fehler durch die automatische Kontrolle angezeigt werden, die noch einmal manuell geprüft werden.

2.2 Bestand

Der Bestand wird nach Klaus und Krieger wie folgt definiert:

„Der Bestand stellt die Summe der gelagerten Warenmengen in einem Lager dar.“¹¹

Die Formulierung muss im weiteren Sinne verstanden werden, denn nicht nur Materialien im Lager, sondern auch welche, die zum Beispiel aktuell an einer Maschine bearbeitet werden oder vor und nach einer Maschine liegen, sind zum Bestand zu zählen. Ausgehend von einem Anfangsbestand, der die Summe der zu einem bestimmten Zeitpunkt im Unternehmen befindlichen Waren bezeichnet, errechnet sich der aktuelle Bestand eines Unternehmens als Differenz zwischen Warenzu- und -abgängen.¹²

Bei der Betrachtung von Arbeitssystemen gibt die Kennzahl Bestand oft die im System befindlichen Aufträge an, also den Auftragsbestand innerhalb des Systems. Weiters wird nach Art der gelagerten Ware unterteilt, also zum Beispiel in Rohmaterial-, Halbfertig- und Fertigwarenbestand.

2.3 Liefertermintreue

Die Liefertermintreue ist Teil der Logistikleistung eines Unternehmens und trägt damit, wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, zur Kundenzufriedenheit und Kundenbindung bei. Definiert ist die Termintreue als Grad der Übereinstimmung zwischen zugesagtem und tatsächlichem Auftragserfüllungstermin.¹³

Als einzige der vier Zielgrößen wird diese direkt vom Kunden wahrgenommen, daher kann eine hohe Liefertermintreue für den Kunden wertsteigernd wirken. Ob mit hoher Logistikleistung jedoch ein Wettbewerbsvorteil geschaffen werden kann, hängt einerseits von den Anforderungen des Kunden und andererseits von branchenüblichen Vergleichswerten ab.¹⁴ Wenn also ein Kunde eine kurze Lieferzeit und hohe Liefertermintreue als Basisleistung betrachtet, kann die Erfüllung dessen nicht als Wettbewerbsvorteil genutzt werden.

2.4 Kapazitätsauslastung

Die Kapazitätsauslastung bezeichnet das Verhältnis zwischen verfügbarer und belegter Zeit einer Produktionskapazität. Als verfügbare Zeit können jedoch unterschiedliche Werte herangezogen werden.

¹¹ Klaus/Krieger (2008), S. 67

¹² Vgl. Nyhuis (2008), S. 222

¹³ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 231

¹⁴ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 230 ff.

Eine Maschine steht theoretisch 24 Stunden pro Tag zur Verfügung, das Personal je nach festgelegtem Schichtplan. Zur Ermittlung der Kapazitätsauslastung müssen diverse Verlustzeiten subtrahiert werden, da eine Berechnung auf Grundlage der Gesamtzeit keinen sinnvollen Wert ergeben würde. In der Literatur wird zwischen folgenden Zeiten unterschieden:¹⁵

- Planbelegungszeit = Kalenderzeit reduziert um fehlende Besetzung, zum Beispiel an Feiertagen
- Geplante Betriebszeit = Planbelegungszeit reduziert um geplante Stillstände, verursacht zum Beispiel durch Wartungsmaßnahmen
- Nettobetriebszeit = Geplante Betriebszeit reduziert um Rüstzeit und Zeit von technischen Störungen
- Nutzbare Betriebszeit = Nettobetriebszeit reduziert um Zeiten für Leerlauf und geringere Prozessgeschwindigkeiten
- Nettoproduktivzeit = Nutzbare Betriebszeit reduziert um Zeiten für Fertigung von Schlechtteilen, zum Beispiel beim Anfahren einer Anlage

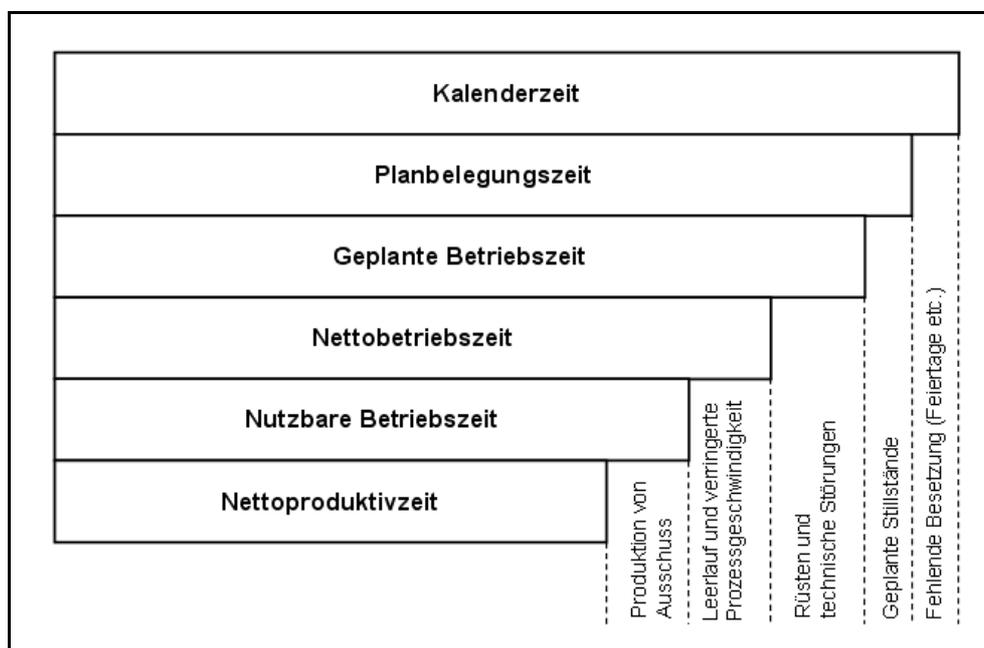


Abbildung 5: Verlustzeiten¹⁶

¹⁵ Vgl. Jodlbauer (2008), S. 25 f.

¹⁶ Vgl. Jodlbauer (2008), S. 26

Die Auslastung entspricht dem Verhältnis zwischen genutzter Zeit für Fertigung inklusive Rüsten zur geplanten Betriebszeit.¹⁷ Nach dieser Definition wird nicht zwischen Personal- und Anlagenkapazität unterschieden. Soll mit reiner Maschinenkapazität gerechnet werden, darf der Zeitverlust durch fehlende Besetzung nur abgezogen werden, wenn die Nutzbarkeit der Anlage in dieser Zeit nicht möglich ist, zum Beispiel aus rechtlichen Gründen.

2.5 Zusammenfassung

Mit den benannten Kennwerten der Produktionslogistik kann die Ausrichtung eines Unternehmens gesteuert werden. Maßnahmen zur Beeinflussung einer Größe betreffen jedoch auch die Übrigen, aus diesem Grund ist es wichtig, das Zusammenspiel der Größen in einem Unternehmen zu kennen.

Im folgenden Abschnitt werden Analysemöglichkeiten dargestellt, mit denen die Zusammenhänge zwischen den fertigungslogistischen Zielgrößen erfasst und interpretiert werden können.

Bei der Betrachtung der Zusammenhänge und den gegebenenfalls daraus folgenden Maßnahmen eines Unternehmens ist immer auch die Entwicklung der Kosten beziehungsweise der Kostenstruktur zu beachten. Maßnahmen, die zum Beispiel eine hohe Auslastung zugunsten einer hohen Termintreue reduzieren, lassen bei Produktionsunternehmen mit hohem Fixkostenanteil die Stückkosten steigen.

¹⁷ Vgl. Jodlbauer (2008), S. 26 f.

3 Analysemöglichkeiten

Um den benannten Kompromiss zwischen den logistischen Zielgrößen zu finden, müssen die Zusammenhänge zwischen ihnen sowohl qualitativ als auch quantitativ dargestellt werden. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten, im Allgemeinen basieren diese auf Prozessmodellen.¹⁸

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit den Grundsätzen der Modellierung.

3.1 Modellierung

Modellierungen von Produktionsprozessen sind immer mit gewissen Vereinfachungen verbunden, da eine reale Darstellung der betrieblichen Gegebenheiten nur innerhalb gewisser Grenzen möglich ist. Zum Beispiel können technische Gebrechen von Anlagen nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden.

Die getroffenen Annahmen müssen in weiterer Folge bei der Ergebnisinterpretation berücksichtigt werden. Die so gewonnenen Ergebnisse müssen also wieder „übersetzt“ werden, um Maßnahmen zur Beeinflussung des realen Systems abzuleiten. Die folgende Abbildung zeigt den grundsätzlichen Ablauf der Arbeit mit Modellen, bezogen auf ein Materialflusssystem.

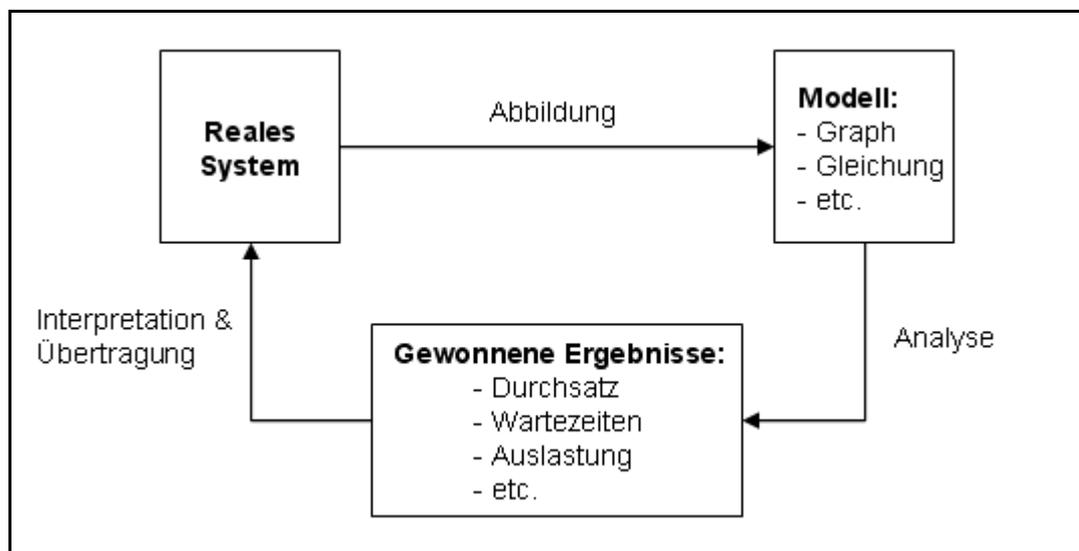


Abbildung 6: Ablauf der Arbeit mit Modellen¹⁹

¹⁸ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 233

¹⁹ Vgl. Arnold/Furmans (2007), S. 47

Je nach Zielsetzung werden verschiedene Modelltypen zur Lösungsfindung herangezogen. Ein Erklärungsmodell dient zur Analyse von Gesetzmäßigkeiten eines Systems und zur Erklärung der Wirkungsweise unter bestimmten Voraussetzungen. Optimierungsmodelle hingegen werden zur Findung eines optimalen oder annähernd optimalen Lösungsweges eine bestimmte Zielvorgabe betreffend entwickelt.²⁰

Jede Problemstellung benötigt zur Lösung ein Modell mit bestimmten Eigenschaften, im Folgenden werden diese Charakteristika näher beschrieben:²¹

- **Statische und dynamische Modelle:** Ein statisches Modell bildet ein System zu einem bestimmten Zeitpunkt ab, während ein dynamisches Modell die zeitliche Veränderung des Systems berücksichtigt.
- **Diskrete und stetige Modelle:** Ein diskretes Modell arbeitet mit einer Zustandsvariable, die nur bestimmte Werte annehmen kann, das System springt also von einem Zustand in den nächsten. Bei stetigen Modellen hingegen ändert sich der Zustand des Systems kontinuierlich.
- **Deterministische und stochastische Modelle:** Deterministische Modelle arbeiten ausschließlich mit vorgegebenen Variablen, während stochastische Modelle zusätzlich eine oder mehrere Zufallsvariablen verwenden.

Nach dem Wienerschen Theorem kann eine stetige Funktion als Überlagerung mehrerer diskreter Funktionen angegeben werden. Wenn mit diskreten Modellen einfacher und schneller ein nicht verfälschtes Ergebnis erreicht wird, ist eine äquivalente Verwendung von stetigen und diskreten Modellen also erlaubt.²²

Die Abgrenzung zwischen stochastischen und deterministischen Modellen zeigt, dass bereits die Verwendung von einer zufallsabhängigen Variable zu einem stochastischen Modell führt.

In realen Systemen sind zum Beispiel die Zwischenankunftszeiten von Arbeitsinhalten an ein Arbeitssystem immer gewissen Schwankungen unterworfen. Diese Unregelmäßigkeiten sind zwar nicht zufällig, sondern hängen beispielsweise von technischen Störungen oder verminderten Prozessgeschwindigkeiten ab, sind aber nicht oder nur

²⁰ Vgl. Domschke/Drexel (2004), S. 3

²¹ Vgl. Küll/Stähly (1999), S. 4

²² Vgl. Arnold/Furmans (2007), S. 48 f.

sehr kompliziert modellierbar. Daher werden in der Praxis statt komplexen deterministischen Modellen oft stochastische Modelle verwendet.²³

Laut Nyhuis ist zwischen drei grundsätzlichen Modellierungsansätzen zu unterscheiden:²⁴

- Kennlinientheorie
- Simulation
- Warteschlangentheorie

In den folgenden Abschnitten werden diese Methoden näher beschrieben und im Anschluss miteinander verglichen.

3.2 Kennlinientheorie

Die Kennlinientheorie dient der Visualisierung der produktionslogistischen Zielgrößen und deren Wechselwirkungen. Zwei grundsätzliche Überlegungen helfen bei der Interpretation dieser Darstellungsformen, die sogenannte Trichterformel und das Gesetz von Little oder zu Englisch Little's Law.

Die Trichterformel besagt, dass die mittlere Reichweite des Bestandes aus dem Quotienten von mittlerem Bestand in Vorgabestunden und mittlerer Leistung in Vorgabestunden pro Zeiteinheit errechnet wird. Sie gibt also die Dauer in Zeiteinheiten für das Abarbeiten des Bestandes bei gegebener mittlerer Leistung an.²⁵

Das Gesetz von Little sagt aus, dass die mittlere virtuelle Durchlaufzeit aus dem Verhältnis zwischen Bestand in Aufträgen und Leistung in Aufträgen pro Zeiteinheit angegeben werden kann. Damit lässt sich die mittlere Zeit bis zur Fertigstellung eines neu eingelasteten Auftrages bestimmen. Das Ergebnis des Gesetzes von Little hängt auch von Abarbeitungsregeln ab, da die Leistung mit Aufträgen pro Zeiteinheit bewertet wird. So verfälschen Regeln, die sich auf die Abarbeitungsdauer beziehen, wie zum Beispiel die Regeln „Kürzeste Operationszeit“ (KOZ) und „Längste Operationszeit“ (LOZ) das Ergebnis. Die KOZ-Regel besagt, dass jene Aufträge zuerst abzuarbeiten sind, welche die kürzeste Abarbeitungsdauer aufweisen, die LOZ-Regel präferiert jene mit der längsten Dauer. Der Leistungswert wird damit bei Abarbeitung nach

²³ Vgl. Arnold/Furmans (2007), S. 49

²⁴ Vgl. Nyhuis (2008), S. 189

²⁵ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 236 und Nyhuis (2008), S. 195

KOZ-Regel tendenziell zu hoch angenommen, bei Verwendung der LOZ-Regel zu niedrig.²⁶

Die Bestimmung der Durchlaufzeit nach dem Gesetz von Little kann daher bei Verwendung einer der benannten Reihenfolgeregeln nur verwendet werden, wenn die Streuung der Abarbeitungszeiten sehr gering ist.

3.2.1 Durchlaufdiagramm

In ein Durchlaufdiagramm werden Zu- und -abgänge von Arbeitsinhalten (zum Beispiel Aufträgen) bewertet durch festgelegte Vorgabezeiten als Funktion der Zeit dargestellt.²⁷

Aus den Zu- und Abgangskurven können die Mittelwerte als Geraden in das Diagramm eingetragen werden, die Steigungen der beiden Geraden geben die mittlere Leistung und die mittlere Belastung des Arbeitssystems an.

Die folgende Abbildung zeigt ein Durchlaufdiagramm, als Dimension der Arbeit wurden Stunden (Std) gewählt, für die Zeit wurden in Betriebskalendertage (BKT) gewählt.

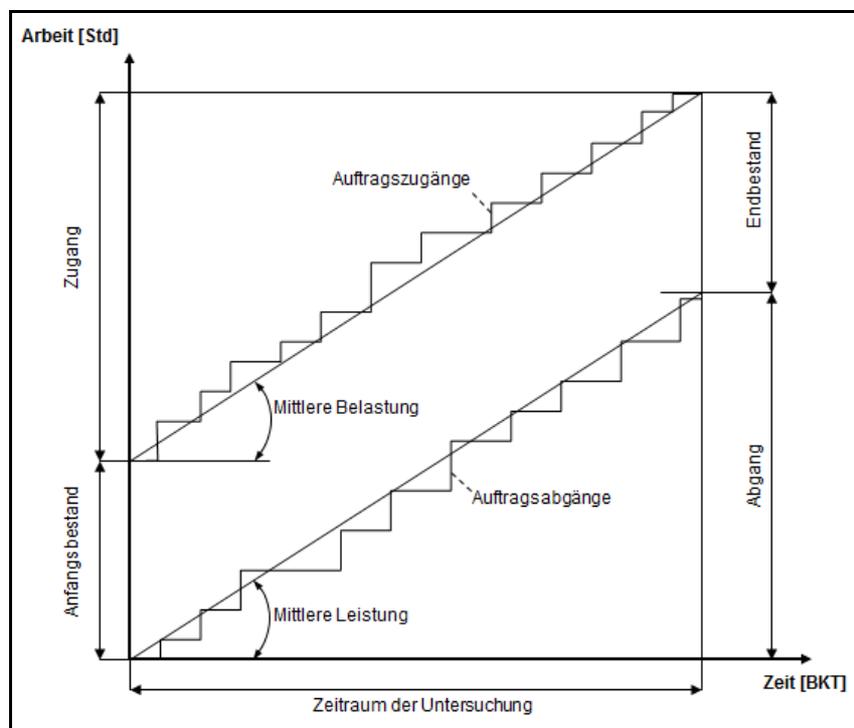


Abbildung 7: Durchlaufdiagramm²⁸

²⁶ Vgl. Nyhuis (2008), S. 195 f.

²⁷ Vgl. Schmidt/Wriggers (2008), S. 142

²⁸ Vgl. Wiendahl (2008), S. 265 und Schmidt/Wriggers (2008), S. 142

Die produktionslogistischen Zielgrößen lassen sich in einem Durchlaufdiagramm bezogen auf das dargestellte System erkennen und quantifizieren.

Der Bestand im abgebildeten Arbeitssystem wird über die Differenz der vertikalen Größen von Auftragszugängen und -abgängen ermittelt. Als Dimension des Bestandes dienen Vorgabestunden.

Die Durchlaufzeit lässt sich über den horizontalen Abstand zwischen Zu- und -abgang eines Auftrags errechnen. Angegeben wird die Durchlaufzeit in Betriebskalendertagen. Die so ermittelte Zeit entspricht nur der Durchlaufzeit des abgebildeten Systems, also eines Arbeitsplatzes oder eines Lagers. Für einige Reihenfolgeregeln müssen hierzu aber die Aufträge mit Startzeitpunkt in das Diagramm eingezeichnet werden, als Beispiele sind die bereits benannten Regeln LOZ und KOZ zu nennen.

Die Auslastung des Systems stellt sich über die Steigungen der mittleren Auftragszu- und -abgänge, als Quotient aus mittlerer Leistung zu mittlerer Belastung, dar.

Für die Termintreue muss zusätzlich festgehalten werden, wann ein Systemelement planmäßig abgehen soll, der tatsächliche Wert kann aus dem Durchlaufdiagramm abgelesen werden.

Aus Durchlaufdiagrammen lassen sich die produktionslogistischen Zielgrößen eines Arbeitssystems zu bestimmten Zeitpunkten und für bestimmte Aufträge ermitteln. Durch Bildung des Durchschnitts einer Periode können damit die Zielgrößen ermittelt und Sollwerten gegenübergestellt werden.

Nyhuis meint dazu:

„Das Durchlaufdiagramm beschreibt das dynamische Systemverhalten qualitativ und zeitpunktgenau. Es zeigt die Wirkungszusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen auf. Daraus lassen sich grundlegende Informationen über die Produktionsabläufe gewinnen und hinsichtlich verschiedener Fragestellungen analysieren.“²⁹

Ein Kritikpunkt an Durchlaufdiagrammen ist allerdings, dass die Wirkungszusammenhänge zwar dargestellt werden, sich allerdings gar nicht oder nur unzureichend erklä-

²⁹ Nyhuis (2008), S. 194

ren lassen.³⁰ Die im folgenden Abschnitt behandelten Produktionskennlinien helfen bei einer solchen Erklärung.

3.2.2 Produktionskennlinien

Die Produktionskennlinien geben die mittlere Leistung, mittlere Reichweite und Durchlaufzeit sowie Termintreue als Funktion des Bestandes an und wurden ausgehend von Simulationen bis zum heutigen Zeitpunkt stetig weiterentwickelt.³¹ Als Bestand wird hier, wie auch bei den Durchlaufdiagrammen, der Bestand an Arbeit in einem Arbeitssystem bezeichnet, gemessen in Stunden, die für die Abarbeitung benötigt werden.

Abbildung 8 zeigt den aktuellen Stand der Produktionskennlinien nach Arnold et al. und Nyhuis.

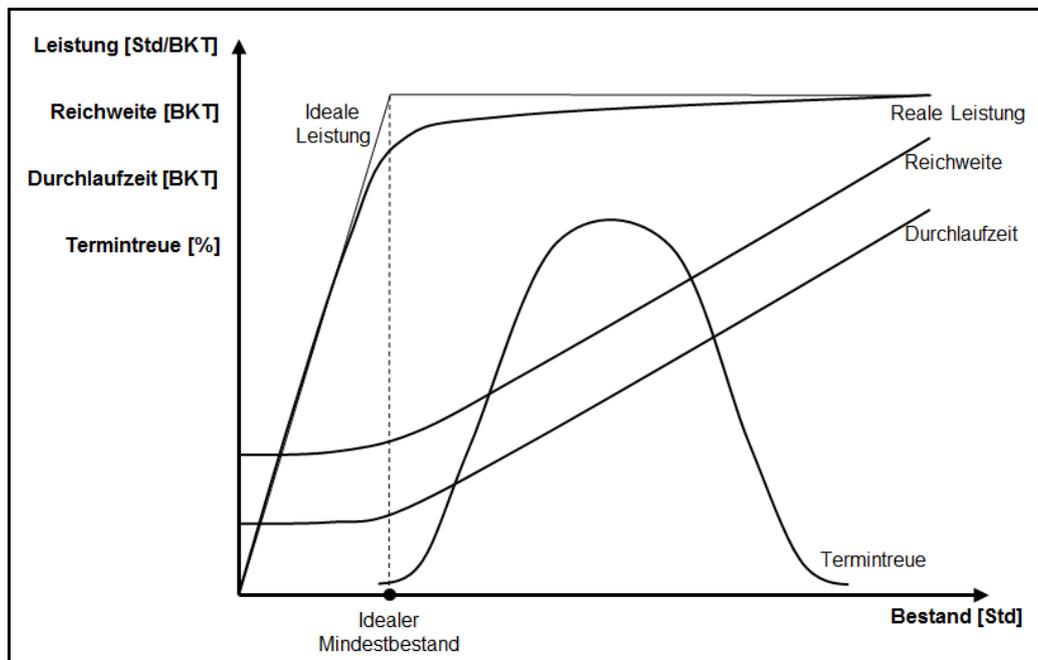


Abbildung 8: Produktionskennlinien³²

Die ideale Leistung eines Arbeitssystems ergibt sich aus der Annahme, dass es bei der Abarbeitung der Aufträge keinerlei Wartezeiten oder Leerzeiten gibt, dass also immer genau ein Auftrag im Arbeitssystem ist. Wenn das der Fall ist, entspricht der Bestand im System genau der Bearbeitungszeit der zu bearbeitenden Aufträge. Wenn die

³⁰ Vgl. Nyhuis (2008), S. 196

³¹ Vgl. Lödging (2008), S. 59 f.

³² Vgl. Nyhuis (2008), S. 188 und Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 240

maximale Leistung bekannt ist, ergibt sich am Knickpunkt der Wert für den idealen Mindestbestand.³³

Um die ideale in eine reale Leistungskennlinie zu überführen, wurde mit Hilfe zahlreicher Simulationen eine Approximationsgleichung entwickelt. Diese enthält einen Streckfaktor, der die speziellen betrieblichen Gegebenheiten, Belastungsstreuung, Kapazitätsflexibilität und Flexibilität der Bestandszuordnung zusammenfassend beschreibt.³⁴

Die Reichweite ergibt sich aus der Trichterformel, also dem Verhältnis aus Bestand zu Leistung. Aus der Reichweite lässt sich die Durchlaufzeit ermitteln, diese ist um die Streuung der Abarbeitungszeiten zur Reichweite versetzt. Nimmt die Streuung den Wert Null an, so sind die Kurven von Reichweite und Durchlaufzeit identisch.³⁵ Ursache dafür ist die Gewichtung der Reichweite mit der Auftragszeit, Aufträge mit höheren Durchführungszeiten erhalten ein höheres Gewicht als jene mit kürzeren Zeiten. Grundsätzlich sind alle Kennlinien als Durchschnittswerte zu verstehen, sie verlaufen für Durchlaufzeit und Reichweite nur dann parallel, wenn keine abarbeitungszeitabhängige Reihenfolgeregel angewandt wird.³⁶

Die Approximation der idealen Kennlinien kann mit folgenden Gleichungen durchgeführt werden:³⁷

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

$$B_m(t) = B_{lmin} * (1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4) + B_{lmin} * \alpha * t$$

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

mit: $L_m(t)$... mittlere Leistung [Std/BKT]

L_{max} ... maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

t ... Laufvariable $0 < t < 1$ [-]

$B_m(t)$... mittlerer Bestand [Std]

B_{lmin} ... idealer Mindestbestand [Std]

³³ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 237 f.

³⁴ Vgl. Nyhuis (2008), S. 200

³⁵ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 239

³⁶ Vgl. Lödding (2008), S. 59 ff.

³⁷ Vgl. Nyhuis (2008), S. 197

α ... Streckfaktor [-]

$R_m(t)$... mittlere Reichweite [BKT]

Im Bereich der Unterlast, also eines niedrigen Bestandes, nehmen sowohl Reichweite als auch Durchlaufzeit einen Minimalwert an, der nicht unterschritten werden kann. Im Bereich der Überlast, wenn sich die Leistung der maximal möglichen nähert, steigen beide Kennwerte proportional zum steigenden Bestand.

Der ideale Mindestbestand wird durch die folgende Gleichung³⁸ errechnet.

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

mit: BI_{\min} ... Idealer Mindestbestand [Std]

ZAU_i ... Auftragszeit pro Arbeitsvorgang [Std]

ZAU_v ... Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

ZTR_m ... mittlere Transportzeit pro Arbeitsvorgang [Std]

Durch Verwendung des Variationskoeffizienten wird die Streuung der Abarbeitungszeiten berücksichtigt. Aufträge mit hohem Zeitbedarf bilden nicht nur einen hohen Bestand, sondern bleiben auch lange im Bestand bestehen, durch Berücksichtigung der Streuung wird diesem Umstand Rechnung getragen.³⁹

Der Zusammenhang von Reichweite und Durchlaufzeit ist in folgender Gleichung⁴⁰ ersichtlich:

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

mit: $ZDL_m(t)$... mittlere Durchlaufzeit [BKT]

$R_m(t)$... mittlere Reichweite [BKT]

ZDF_m ... mittlere Durchführungszeit [BKT]

ZDF_v ... Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]

In der folgenden Abbildung werden die benötigten Faktoren zur Erstellung der Produktionskennlinien näher dargelegt.

³⁸ Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 66

³⁹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 64 f.

⁴⁰ Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 86

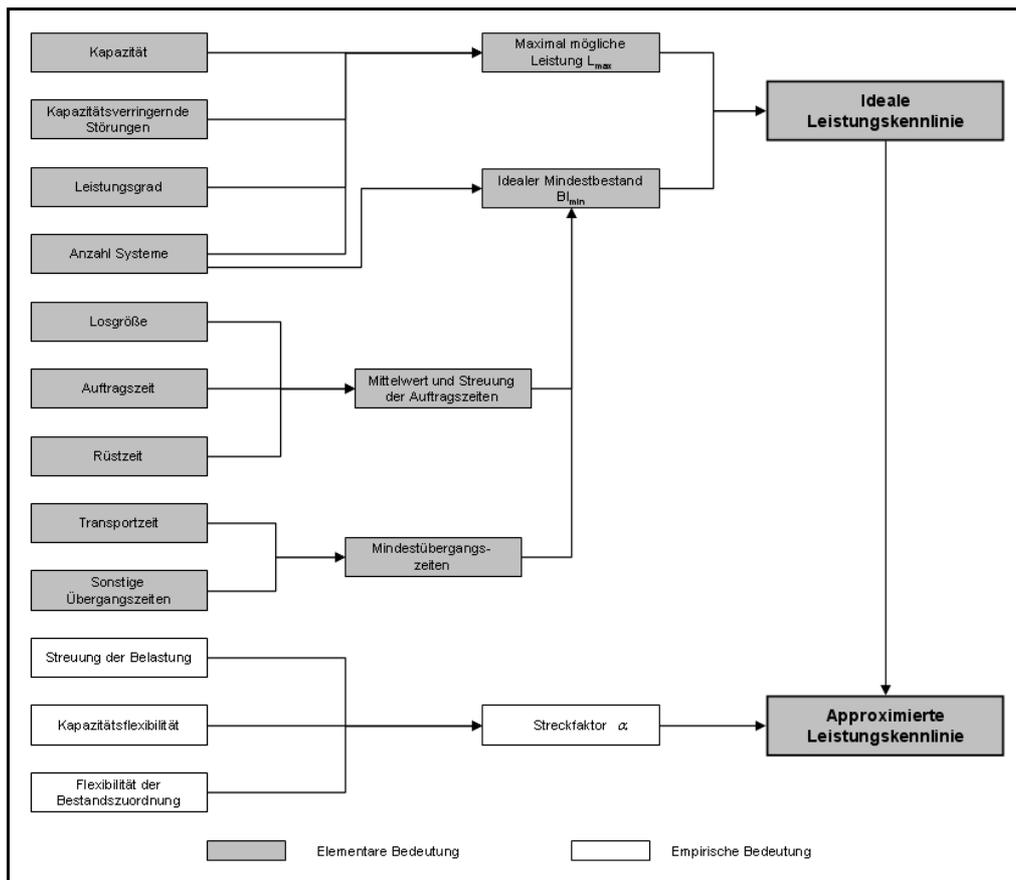


Abbildung 9: Parameter der Produktionskennlinien⁴¹

Praktische Untersuchungen haben ergeben, dass mit einem Standardwert für den Streckfaktor $\alpha = 10$ in vielen Bereichen realistische Ergebnisse zur Darstellung der Zusammenhänge der logistischen Zielgrößen erzielt werden. Dies trifft vor allem zu, wenn auf starke mittel- bis langfristige Schwankungen der Belastung mit Kapazitätsanpassungen oder Einführung von Planungs- und Steuerungsverfahren zum Belastungsausgleich reagiert wird. Wenn die Möglichkeit solcher Anpassungen nicht oder nur in geringem Ausmaß gegeben ist, muss ein höherer Wert für α verwendet werden, bei sehr hoher Anpassungsflexibilität ein geringerer Wert.⁴²

Die Kennlinie der Termintreue basiert auf der Kennlinie der Durchlaufzeit. Es wird davon ausgegangen, dass es eine gewisse Toleranzbreite gibt, innerhalb derer eine Lieferung noch als pünktlich gilt. Würde die Durchlaufzeit keine Streuung aufweisen, wären alle Aufträge innerhalb dieses Fensters des Bestands termintreu. Da die Durchlaufzeit in der Realität in einem gewissen Ausmaß streut, muss eine Verteilung der

⁴¹ Vgl. Nyhuis (2008), S. 200

⁴² Vgl. Nyhuis (2008), S. 204

Durchlaufzeiten angenommen werden. Untersuchungen haben ergeben, dass sich die Annahme einer Normalverteilung für die Darstellung der Kennlinie als ausreichend korrekt erweist, somit kann diese wie in Abbildung 8 dargestellt werden.⁴³

Die Streuung führt dazu, dass manche Aufträge innerhalb des Toleranzfensters nicht fristgerecht fertig gestellt werden und umgekehrt auch manche Aufträge außerhalb des Fensters rechtzeitig ausgeliefert werden können. Somit erreicht die Kennlinie der Termintreue weder 100% noch 0%.⁴⁴

3.2.3 Umsetzung

Um eine Anwendung der Kennlinientheorie möglich zu machen, müssen einige Voraussetzungen eingehalten werden. Vor allem dürfen keine fehlerhaften Daten verwendet werden. Zumindest muss aber bei Unsicherheit über die Korrektheit der Daten der Fehler im Modell abgeschätzt werden und mit in die Interpretation der Ergebnisse einbezogen werden.⁴⁵

In jedem Fall muss auf die Art der Reihenfolgebildung geachtet werden. Die erwähnte und dargestellte Parallelität der Reichweiten- und Durchlaufzeitkennlinie ergibt sich nur, wenn die Abarbeitungsreihenfolge unabhängig von der Auftragsgröße festgelegt wird. Werden zum Beispiel die bereits in Kapitel 3.2 erwähnten Regeln LOZ oder KOZ angewandt, muss eine andere Berechnungsgrundlage für die Durchlaufzeitkennlinie verwendet werden. Der Unterschied beschränkt sich auf die Warte- bzw. Liegezeit vor der Bearbeitung. Folgende Gleichungen werden von Nyhuis und Wiendahl zur Berechnung der Durchlaufzeiten für andere Reihenfolgeregelungen als die auftragsgrößenunabhängige FIFO (First In First Out)⁴⁶ - Regel angegeben, es wird jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sie nur zur Berechnung von Einzelarbeitssystemen geeignet sind:⁴⁷

$$ZL_{FIFO}(t) = ZDL_m(t) - ZDF_m - ZTR_m$$

$$ZL_{LOZ}(t) \approx ZL_{FIFO}(t) * (1 + ZDF_v^2) + ZDF_m + ZTR_m$$

$$ZL_{LOZ}(t) \approx ZL_{FIFO}(t) * \frac{1}{(1 + ZDF_v^2)} + ZDF_m + ZTR_m$$

⁴³ Vgl. Yu (2009), S. 115 ff. und Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 240 f.

⁴⁴ Vgl. Lödding (2008), S. 225

⁴⁵ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 145

⁴⁶ First In First Out bedeutet, dass der erste der Auftrag, der in ein System (z.B. Arbeitssystem oder auch ein Lager) eintritt auch der erste ist, der es wieder verlässt

⁴⁷ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 87 ff.

- mit: $ZL_{FIFO}(t)$... mittlere Liegezeit bei Anwendung der FIFO-Regel [BKT]
 $ZDL_m(t)$... mittlere Durchlaufzeit [BKT]
 ZDF_m ... mittlere Durchführungszeit [BKT]
 ZTR_m ... mittlere Transportzeit [BKT]
 $ZL_{LOZ}(t)$... mittlere Liegezeit bei Anwendung der LOZ-Regel [BKT]
 $ZL_{KOZ}(t)$... mittlere Liegezeit bei Anwendung der KOZ-Regel [BKT]
 ZDF_v ... Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]

Bei fehlerfreien Daten können die Kennlinien nach den genannten Gleichungen entwickelt werden. Eine Überprüfung des so entwickelten Modells kann beispielsweise über real gemessene Daten oder eine Simulationsstudie (siehe Kapitel 3.3) durchgeführt werden. Wenn die Kennlinientheorie als Alternative zu einer Simulation gewählt wurde, muss demzufolge auf reale Daten zurückgegriffen werden. Hierbei werden einzelne Betriebszustände genau analysiert und geprüft, ob die real gemessenen Zustände mit dem Modell übereinstimmen. Ist dies überwiegend der Fall kann davon ausgegangen werden, dass die Kennlinien die Fertigungsabläufe ausreichend gut abbilden.⁴⁸

Daraus ergibt sich bereits ein Vorteil der Kennlinientheorie, sie kann relativ einfach überprüft und gegebenenfalls (zumindest in Grenzen) angepasst werden. Die Ergebnisse der Berechnungen sind durch Darstellung in Kennlinienform einfach zu verstehen und dadurch zu interpretieren.

Ein Nachteil der Kennlinientheorie ist beispielsweise der reine Bezug auf ein Arbeitssystem. Es können zwar mehrere Einzelarbeitsplätze zu einem System zusammengefasst werden, für eine Betrachtung des Durchlaufs der gesamten Fertigung eines Unternehmens muss zusätzlich auf andere Methoden zurückgegriffen werden. Der hohe Erstellungsaufwand der Kennlinien ist ebenfalls als Nachteil zu nennen, allerdings kann das Modell, wie bereits erwähnt, auch nachträglich in gewissen Grenzen angepasst werden.⁴⁹

⁴⁸ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 102

⁴⁹ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 294 f.

3.2.4 Anwendung auf die Problemstellung von SIG Combibloc

Ausgehend von Auftragszu- und -abgängen können als erster Schritt Durchlaufdiagramme für die verschiedenen Arbeitssysteme erstellt werden. Daraus lassen sich die produktionslogistischen Zielgrößen ableiten. Für eine Ermittlung der Zusammenhänge der Zielgrößen müssen daraufhin die Produktionskennlinien ermittelt werden.

Mit Hilfe der zuvor dargelegten Approximationsgleichung können bei Kenntnis der maximalen Leistung und des idealen Mindestbestandes die Kennlinien der Arbeitssysteme erstellt werden. Die maximal mögliche Leistung ergibt sich, wie in Abbildung 9 dargestellt, aus der gesamt nutzbaren Kapazität.

So können Produktionskennlinien für das Arbeitssystem „Endfertigung“ bei SIG Combibloc erstellt werden. Eine Betrachtung dieses Produktionsschrittes erweist sich aus mehreren Gründen als sinnvoll:

- Die Beschichtungsanlage wird zu einem großen Teil auftragsanonym betrieben, Anfahrzeit und -kosten sprechen gegen eine Auftragsfertigung
- Die Druckerei fertigt zwar zum Großteil auftragsbezogen, zur Verringerung der Rüstkosten und des Materialeinsatzes werden kleine Aufträge aber zum Teil vorproduziert. Dabei muss wiederum zwischen zwei Fällen unterschieden werden:
 - Ein Kundenauftrag liegt bereits vor, Lieferdatum befindet sich allerdings so weit in der Zukunft, dass der Auftrag normalerweise nicht gefertigt würde.
 - Es ist kein Kundenauftrag vorhanden, die Vorproduktion erfolgt auf Basis von Prognosezahlen, wenn der Kunde die Menge nicht abnimmt, muss sie verschrottet werden.
- Die Endfertigung stellt in den betrachteten Produktionswerken den Engpass der Fertigung dar. Aufträge, die vorzeitig bedruckt wurden, werden daher im Normalfall nicht vorzeitig endgefertigt.

Durch Erstellung der Produktionskennlinien für den Produktionsschritt Endfertigung kann der optimale Bestand zur Einhaltung der Lieferzeit angegeben werden. Dazu muss zusätzlich die bereits vergangene Zeit von Auftragseingang bis zum Beginn dieses Schrittes angegeben werden.

3.3 Simulation

Simulationen stellen eine weitere Möglichkeit der Arbeit mit Modellen dar, Kumpf beschreibt sie folgendermaßen:

„Das Simulieren entspricht dem Nachahmen der realen Wirkungszusammenhänge in einer virtuellen Rechnerwelt.“⁵⁰

Die Simulationsarbeit findet insbesondere dort Anwendung, wo die Strukturen zu komplex sind, um herkömmliche Rechenmethoden zur Lösungsfindung verwenden zu können. Dazu zählen zum Beispiel Systeme mit wechselseitigen Abhängigkeiten, die dynamischen Veränderungen unterworfen sind. Beispiele häufiger Anwendungen sind:⁵¹

- Ermittlung von Spezifikationen des betrachteten Systems, die es ermöglichen, ein gegebenes Ziel möglichst gut oder optimal erreichen, also die Optimierung eines Modells
- Informationsgewinnung zum besseren Verständnis des zu analysierenden Problems
- Analyse des künftigen Verhaltens des Systems

An dieser Stelle sei noch einmal auf die unterschiedlichen Charakteristika von Modellen hingewiesen, die am Anfang von Kapitel 3.1 erklärt wurden.

Das typische Vorgehen der (stochastischen) Simulation umfasst nach Kolonko folgende Teilbereiche:⁵²

- Erstellung eines Modells des betreffenden Systems
- Ermittlung der nötigen Input-Daten
- Durchführung der Simulation
- Auswertung, Interpretation und Darstellung der Ergebnisse
- (Gegebenenfalls) Modellanpassung

Die Erstellung des Modells lässt sich in mehrere Phasen gliedern. Ziel der Phasen ist ein für die Simulation ausführbares Modell. Als Zwischenstufen entstehen Konzeptmodelle und formale Modelle. Das Konzeptmodell beschreibt das abzubildende System grundsätzlich, es enthält bereits die Funktionalitäten und Grenzen des Systems. Das

⁵⁰ Kumpf (2001), S. 42

⁵¹ Vgl. Küll/Stähly (1999), S. 2

⁵² Vgl. Kolonko (2008), S. 2

formale Modell konkretisiert die im Konzeptmodell beschriebenen Zusammenhänge und formalisiert sie. Umgesetzt wird das formale Modell daraufhin in ein ausführbares Modell, mit dem eine Simulationsstudie umgesetzt werden kann. Je nach Programm, das zur Simulation verwendet wird, werden die Phasen der Modellerstellung unterschiedlich deutlich voneinander abgegrenzt.⁵³

3.3.1 Simulationsmethoden

Zu Beginn von Kapitel 3.1 wurde bereits dargelegt, dass in der Praxis statt komplexen deterministischen Modellen stochastische verwendet werden können, um den Aufwand einer Simulation zu verringern.

Bei der Durchführung wird zwischen verschiedenen Simulationsmethoden unterschieden. Diese definieren die Berücksichtigung des Zeitverhaltens während der Simulation. Eine kontinuierliche Simulation bildet die Zeitvariable stetig ab, dazu wird eine Reihe gekoppelter Differentialgleichungen benötigt. Die diskrete Simulation betrachtet wiederum nur gewisse Zeitpunkte, hierbei kann zwischen der zeitgesteuerten und der ereignisorientierten Simulation unterschieden werden.⁵⁴

Der Unterschied zwischen ereignis- und zeitgesteuerter diskreter Simulation lässt sich über das Änderungsverhalten der Zeitvariable erklären. Im ersten Fall ändert sich die Zeitvariable mit Eintreten eines Ereignisses, im zweiten Fall wird sie immer um einen gewissen festgelegten Schritt Δt fortgeschrieben. Bei sehr kleiner Wahl von Δt wird ein kontinuierliches Verhalten angenähert, der Zeit- und Rechenaufwand erhöht sich aber dementsprechend.⁵⁵

Zur Verdeutlichung des Unterschieds zwischen zeitgesteuerter und ereignisorientierter Simulation kann als Beispiel die Art der zeitlichen Ermittlung der Anzahl von Aufträgen in einem Arbeitssystem genannt werden. Bei der ereignisorientierten Simulation wird die Zeitvariable mit Ankunft oder Fertigstellung eines Auftrags (Ereignis) aktualisiert. Bei der zeitgesteuerten Simulation hingegen wird immer nach Erhöhung der Zeitvariablen gemessen, wie viele Aufträge aktuell im Arbeitssystem sind. Zur Simulierung der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten können in beiden Fällen Verteilungsfunktionen verwendet werden.

⁵³ Vgl. Wenzel/Weiß/Collisi-Böhmer/Pitsch/Rose (2008), S. 7

⁵⁴ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 78 f.

⁵⁵ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 78 f.

Abbildung 10 stellt die Änderung der Zeitvariablen der verschiedenen Simulationsmethoden dar.

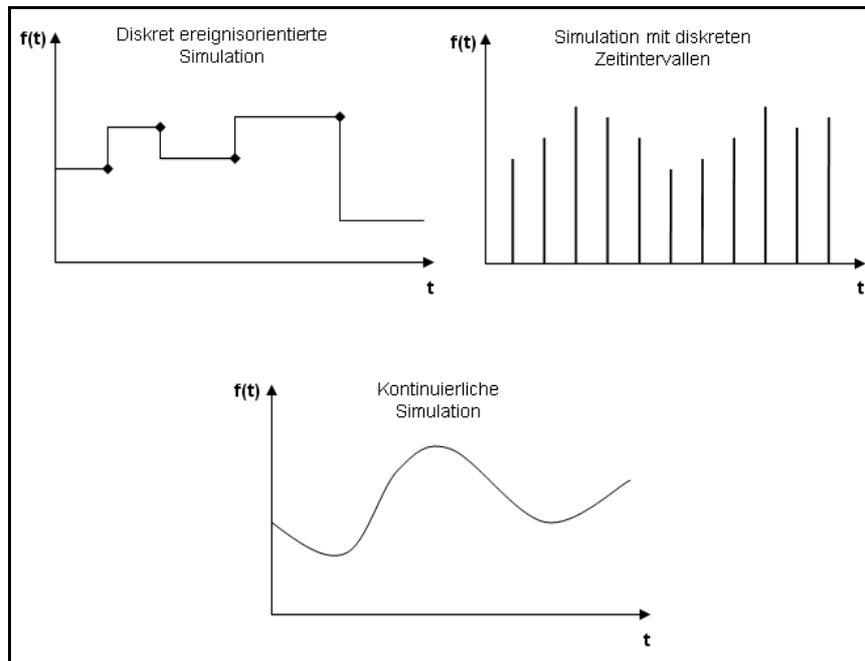


Abbildung 10: Zeitdarstellung der verschiedenen Simulationsmethoden⁵⁶

In den Bereichen der Produktion und Logistik hat sich die diskrete ereignisorientierte Simulation etabliert,⁵⁷ aus diesem Grund wird diese Methode im Folgenden näher beschrieben.

3.3.2 Ereignisorientierte Simulation

Die ereignisorientierte Simulationsmethode beschreibt das System über Ereignisse, Prozesse und Aktivitäten, Arnold et al. unterscheiden diese drei Möglichkeiten wie folgt:⁵⁸

- Ereignisse sind nicht weiter zerlegbar und benötigen keine Zeit, sie lösen eine Zustandsänderung aus. Der dadurch entstehende Zustand wird erst durch Eintreten eines weiteren Ereignisses geändert.
- Prozesse sind eine Folge von zeitlich definierten Ereignissen, die zumeist einem gewissen Simulationsobjekt zugeordnet werden können.

⁵⁶ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 79

⁵⁷ Vgl. Wenzel/Weiß/Collisi-Böhmer/Pitsch/Rose (2008), S. 1

⁵⁸ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 79

- Aktivitäten sind durch ein Anfangs- und ein Endereignis gekennzeichnet, sie transformieren den Zustand eines Objektes mittels Operationen.

Der prinzipielle Ablauf des Fortschritts der Zeit bei der ereignisgesteuerten Simulation wird in Abbildung 11 nach Wehrle, Günes und Gross dargestellt.

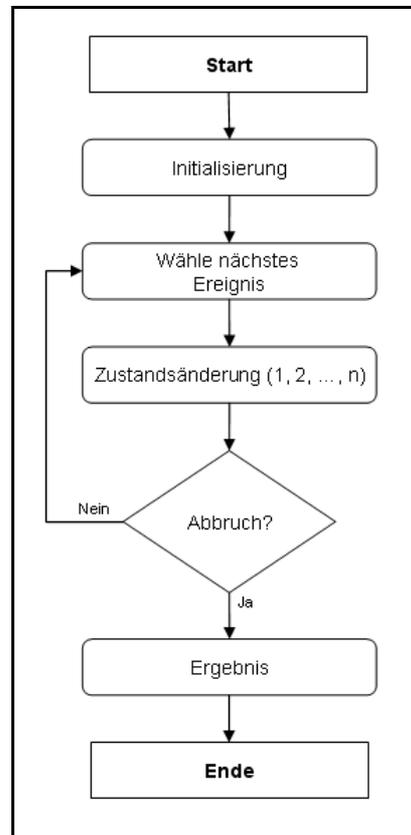


Abbildung 11: Ablauf der ereignisgesteuerten Simulation⁵⁹

Der Schritt der Initialisierung umfasst die Erstellung der Zeit- und Zustandsvariablen, die Zustandsänderung hängt vom eintretenden Ereignis ab und ist für jedes eintretende Ereignis definiert. Sie kann neben der Änderung der Zustandsvariablen auch andere Schritte auslösen, wie zum Beispiel die Erstellung bzw. Änderung eines Ablaufprotokolls. Das Ende einer Simulation wird durch Abfrage einer Abbruchbedingung ausgelöst. So kann der Abbruch zum Beispiel ausgelöst werden, wenn eine Liste, welche die künftigen Ereignisse enthält, leer ist.⁶⁰

⁵⁹ Vgl. Wehrle/Günes/Gross (2010), S. 4

⁶⁰ Vgl. Wehrle/Günes/Gross (2010), S. 4 f.

3.3.3 Umsetzung

Zur Umsetzung einer Simulation werden Simulationssysteme, auch Simulatoren genannt, verwendet. Neben einem eigens für den vorgesehenen Zweck programmierten Werkzeug kann auch aus dem Angebot zahlreicher Hersteller gewählt werden. Diese besitzen meist integrierte grafische Oberflächen und Module, welche die Verwendung in verschiedenen Anwendungsbereichen erlauben.

Solche Simulationssysteme lassen sich nach Arnold et al. in folgende Teilbereiche gliedern:⁶¹

- Simulatorkern (enthält Funktionen zur Erzeugung und Abarbeitung von Ereignissen und zur Anwendung verschiedener Verteilungsfunktionen)
- Modellwelt (Vordefinierte Elemente zur Modellierung des Systems)
- Interne Datenverwaltung
- Bedienoberfläche
- Schnittstellen zu externen Daten

Simulationsstudien werden in der Literatur differenziert betrachtet, in manchen Werken überwiegen die Vorteile, in manchen die Nachteile.

Als Vorteil von Simulationen erweisen sich der Sicherheitsgewinn durch die Vermeidung von Planungsfehlern, die Lösungsverbesserung durch entstehende Strukturoptimierungen und das bessere Systemverständnis. Weiters lassen sich mit Simulationen verschiedene Lösungsvarianten zur Grundlage einer Entscheidungsfindung erarbeiten.⁶²

Ein Nachteil von Simulationsstudien ist beispielsweise die aufwendige Modellerstellung, für jeden Anwendungsfall muss ein neues Modell erstellt werden. Weiters ist die Validierung der Studie oft nur möglich, wenn ein reales System vorhanden ist, mit dem die gewonnenen Daten verglichen werden können. Ein Problem der Simulation ist auch die Gefahr, dass ein Modell durch zu starke Nähe zur Realität für diese gehalten wird. Eine kritische Betrachtung der so ermittelten Ergebnisse kann in diesem Fall nur unzureichend durchgeführt werden.⁶³

⁶¹ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 84

⁶² Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 76

⁶³ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 54 ff.

3.3.4 Anwendung auf die Problemstellung von SIG Combibloc

Zur Erstellung einer Simulationsstudie bei SIG Combibloc muss zuerst das Bestellverhalten der Kunden analysiert werden. So können Kundengruppen nach Regelmäßigkeit der Bestelleingänge gebildet werden. Für jede dieser Gruppen muss dazu eine statistische Analyse des Bestellverhaltens durchgeführt werden, so können passende Verteilungsfunktionen des Bestellverhaltens ermittelt werden.

Nach der so ermittelten Verteilungsfunktion werden die Aufträge in das System geleitet. Die Aufträge müssen daraufhin nach dem Vorgehen von SIG Combibloc in die entsprechende Produktionsreihenfolge gebracht werden. Dazu werden bei SIG einerseits niedrige Rüstkosten und andererseits eine hohe Liefertermintreue angestrebt. Bei einer ersten Erstellung des Produktionsplans steht die Minimierung der Rüstkosten im Fokus. Für die genaue Reihenfolgebildung wird daraufhin die Schlupfzeitregel angewandt. Diese besagt, dass die Aufträge nach der Differenz der Zeitspanne bis zum zugesagtem Liefertermin und verbleibender Restfertigungszeit geordnet werden, wobei dem Auftrag mit der geringsten Differenz die höchste Priorität zugewiesen wird.⁶⁴

Aus dem simulierten Produktionsdurchlauf können die entstehenden Durchlaufzeiten verschiedener Belastungsgrade ermittelt werden. Aktuelle Maschinengeschwindigkeiten und die verwendeten Reihenfolgeregeln spielen hierbei für die Richtigkeit der ermittelten Ergebnisse eine wichtige Rolle.

Als Problem einer Simulationsstudie bei SIG Combibloc erweist sich vor allem die Erstellung des Produktionsplans, da für die Minimierung der Rüstkosten eine Vielzahl von Faktoren berücksichtigt werden muss, welche die Erstellung von Simulationsmodellen erschwert. Diese Faktoren betreffen vor allem die Größe verschiedener Packungen, aber auch beispielsweise die Beschaffenheit des verwendeten Kartonverbundes.

3.4 Warteschlangentheorie

Die Warteschlangentheorie behandelt den Abfertigungsprozess von Objekten an verschiedenen Ressourcen, es wird in diesem Zusammenhang von Warte- oder Bediensystemen gesprochen. Anhand bekannter Informationen sollen vor allem die durchschnittliche Ankunfts- und Abfertigungsrate verschiedener Systeme mathematisch formalisiert und somit vorhersehbar werden. Stochastische Einflüsse, die in der

⁶⁴ Vgl. Brecht (2005), S. 161

Realität auftreten, werden bei der Erstellung eines Warteschlangenmodells miteinbezogen.⁶⁵

Thonemann beschreibt die Warteschlangentheorie anhand des Beispiels eines Postschalters. Kunden kommen mit einer bestimmten Ankunftsrate an und auch die Abfertigung der Kunden erfolgt mit einer bestimmten Rate. Ankunfts- und Abfertigungszeiten werden als stochastisch angenommen. Es sind lediglich deren Verteilungen bekannt, über die genauen Ankunfts- und Abfertigungszeiten liegen keine exakten Informationen vor.⁶⁶

Abbildung 12 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Wartesystems mit dessen Bestandteilen.

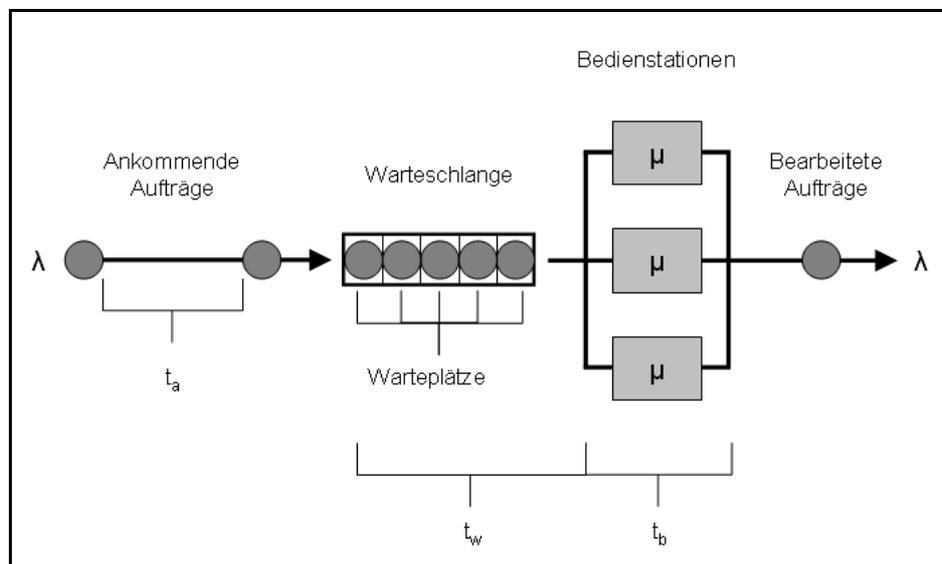


Abbildung 12: Wartesystem⁶⁷

Die Ankunftsrate wird in Abbildung 12 mit dem Symbol λ beschrieben, sie wird über den Erwartungswert der Zwischenankunftszeiten $E(t_a)$ mit der Formel $\lambda = 1/(E(t_a))$ berechnet. Die Bedienrate μ wird über den Erwartungswert der Bedienzeiten $E(t_b)$ mit $\mu = 1/(E(t_b))$ ermittelt. Sie geht von einer vollen Auslastung der Bedienstationen aus und gibt in diesem Fall an, wie viele Kunden maximal pro Zeiteinheit bedient werden können. Die Zeitspanne, die ein Objekt bis zu dessen Bearbeitung in der Warteschlange verbringen muss, wird als Wartezeit t_w bezeichnet.⁶⁸

⁶⁵ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 41

⁶⁶ Vgl. Thonemann (2010), S. 562

⁶⁷ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 58

⁶⁸ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 58

3.4.1 Notation von Wartesystemen

Um die Verteilungen und andere Eigenschaften von Wartesystemen einteilen zu können, müssen sie formell beschrieben werden, dazu hat sich die sogenannte Kendall-Notation durchgesetzt. Die in Klammer notierten Parameter sind als optional zu verstehen:⁶⁹

$$A | B | m (k | n | D)$$

A... Verteilung der Ankunftszeiten

B... Verteilung der Bedienzeiten

m... Anzahl identischer, parallel arbeitender Bediensysteme

k... Kapazität der Warteschlange

n... Anzahl der maximal möglichen Objekte im Wartesystem, auch Weltpopulation genannt

D... Disziplin der Warteschlange, also Art der Reihenfolgebildung

Werden die Parameter k, n oder D nicht angegeben, so wird von unendlicher Kapazität ($k = \infty$), unendlich großer Weltpopulation ($n = \infty$) und einer Reihenfolgebildung nach FCFS (First-Come-First-Served)⁷⁰ ausgegangen.⁷¹

Die folgenden häufig anzutreffenden Abkürzungen werden für die Verteilungen von Ankunfts- und Bedienzeiten, also A und B, verwendet:⁷²

M... Exponentialverteilung (Markov-Eigenschaft)

Ek... k-Erlangenverteilung

G... Allgemeine (Generelle) Verteilung, mathematische Verteilung ist nicht bekannt, Erwartungswert und Varianz der entsprechenden Zeiten liegen jedoch vor

3.4.2 Das M | M | 1 - Modell

Als Basismodell der Warteschlangentheorie dient das M | M | 1 - Modell, also ein System, das aus exponentialverteilten Ankunfts- und Bedienzeiten mit den Parametern λ und μ und lediglich einer Bedienstation besteht. Da Exponentialverteilungen der Zei-

⁶⁹ Vgl. Bungartz/Zimmer/Buchholz/Pflüger (2009), S. 221

⁷⁰ First-Come-First-Served bedeutet, dass der Erste in der Warteschlange als nächstes bedient wird, wie zum Beispiel bei einer Kassenschlange in einem Supermarkt.

⁷¹ Vgl. Bungartz/Zimmer/Buchholz/Pflüger (2009), S. 221 ff.

⁷² Vgl. Arnold/Furmans (2007), S. 114 ff.

ten angenommen werden, können die Anzahl der ankommenden und der bedienten Objekte pro Zeiteinheit als Poissonverteilungen dargestellt werden. Der Buchstabe M wird als Abkürzung benutzt, weil das System die sogenannte Markov-Eigenschaft besitzt. Diese wird auch fehlendes Erinnerungsvermögen genannt, da die vergangenen Zustände des Systems für die künftige Entwicklung und somit die Wahrscheinlichkeit einer Zustandsänderung keine Rolle spielen.⁷³

Aufgrund der Markov-Eigenschaft kann das $M|M|1$ - Modell als einfache Markov-Kette abgebildet werden, die Zustandsvariable entspricht der Anzahl der Kunden im System, also in Warteschlange und Bedienstation. Für ein System dieser Art kann die Wahrscheinlichkeit, dass sich k Kunden im System befinden, $P(N(t) = k) = p(k)$, bestimmt werden.⁷⁴

In Abbildung 13 ist die Markov-Kette eines $M|M|1$ Systems dargestellt.

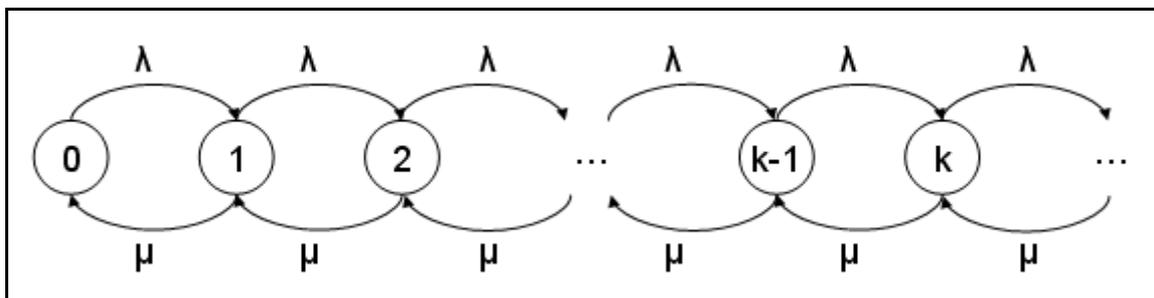


Abbildung 13: Markov-Kette eines $M|M|1$ Modells⁷⁵

Wenn der Auslastungsgrad $\rho = \lambda/\mu$ des Systems kleiner als 1 ist und eine genügend lange Zeitdauer vergangen ist, wird das System als eingeschwungen oder im Gleichgewicht bezeichnet. Bei einem deterministischen System würde sich mit einer Auslastung $\rho < 1$ keine Warteschlange bilden, für den Fall eines stochastischen Prozesses kann das aber auch für Auslastungsgrade dieser Größenordnung eintreffen, die Länge der Warteschlange wird dabei umso größer je näher sich der Auslastungsgrad dem Wert $\rho = 1$ annähert.⁷⁶

Wenn ein eingeschwungener Systemzustand herrscht, können in einem $M|M|1$ - Modell sowohl die Zustandswahrscheinlichkeit $p(k)$, der Erwartungswert der Anzahl der durchschnittlich im (gesamten) System befindlichen Kunden N_s als auch die

⁷³ Vgl. Arnold/Furmans (2007), S. 115 ff.

⁷⁴ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 60

⁷⁵ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 60

⁷⁶ Vgl. Arnold/Furmans (2007), S. 113 f.

durchschnittliche Länge der Warteschlange N_w und die durchschnittliche Wartezeit t_w angegeben werden.⁷⁷

$$p(k) = p(0) \rho^k = (1 - \rho) \rho^k$$

$$N_s = \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{\lambda}{\lambda - \mu}$$

$$N_w = N_s - \rho = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

$$t_w = \frac{N_w}{\lambda}$$

Auf eine mathematische Herleitung der Formeln wird an dieser Stelle verzichtet, sie kann in der Literatur⁷⁸ gefunden werden.

3.4.3 Umsetzung

Für die Anwendung der Warteschlangentheorie muss zuerst erhoben werden, wie die Ankunfts- und Bedienzeiten der einzelnen Fertigungsstufen und Arbeitsplätze statistisch verteilt sind. Dazu müssen vergangene Aufträge und deren Abarbeitungsdauern an den verschiedenen Arbeitsplätzen herangezogen werden. In der Literatur lassen sich für die verschiedenen Verteilungen Formeln zur anschließenden Berechnung des Systems finden.

Ist es nicht möglich eine Verteilung eindeutig auszumachen, kann zum Beispiel für jede Linie ein G | G | 1 - Modell entwickelt werden. Dazu müssen Varianzen sowie Erwartungswerte der Ankunfts- und Bedienzeiten bekannt sein. Aus den Variationskoeffizienten v_a und v_b ergeben sich nach Arnold und Furmans Auslastungsgrad ρ , Variationskennwert f und in einem weiteren Schritt über die mittlere Anzahl der Kunden im System die mittlere Verweilzeit t_s im System und die mittlere Wartezeit t_w :⁷⁹

$$v_a = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_a)}}{E(t_a)} = \lambda \cdot \sigma(t_a)$$

$$v_b = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_b)}}{E(t_b)} = \lambda \cdot \sigma(t_b)$$

⁷⁷ Vgl. Arnold/Isermann/Kuhn/Tempelmeier/Furmans (2008), S. 60 und Arnold/Furmans (2007), S. 113 ff.

⁷⁸ Zum Beispiel bei Arnold/Furmans (2007), S. 115 ff. oder Bungartz/Zimmer/Buchholz/Pflüger (2009), S. 238 f. oder Zimmermann (2008), S. 415 ff.

⁷⁹ Vgl. Arnold/Furmans (2007), S. 128 ff.

$$f = 1 - \frac{v_a^2 + v_b^2}{2}$$

$$N_s \cong \frac{\rho}{1-\rho} \cdot (1-f \cdot \rho)$$

$$t_s = \frac{N_s}{\lambda}$$

$$N_w = N_s - \rho$$

$$t_w \cong \frac{N_w}{\lambda} = \frac{\rho \cdot (1-f)}{\mu \cdot (1-\rho)}$$

Wenn Warteschlangenmodelle als Entscheidungshilfe eingesetzt werden, geschieht dies nach Zimmermann in der Regel auf eine der folgenden Arten:⁸⁰

- Mit dem Modell werden „Wenn - dann“ - Fragen beantwortet, so wird sich Schritt für Schritt der besten Lösung genähert.
- In manchen Fällen können Kostenfunktionen gebildet und in weiterer Folge minimiert werden. Gegenübergestellt werden zum Beispiel Kosten für Wartezeiten und Kosten von Bedienstationen.
- In mehrstufigen Produktionssystemen, in denen jede Maschine ein Warteschlangensystem darstellt, werden mit Hilfe heuristischer Methoden Ergebnisse verwendet, die für einfachere Systeme gelten würden, um das gesamte Verhalten zu verbessern.

Der Vorteil der Warteschlangentheorie ergibt sich vor allem aus der einfachen Anwendung eines erstellten Modells, allerdings werden zur Erstellung der Modelle Annahmen getroffen, die in der Realität meist nicht anzutreffen sind. Außerdem ist eine Anpassung von bereits entwickelten Modellen nur schwer oder gar nicht möglich.⁸¹

3.4.4 Anwendung auf die Problemstellung von SIG Combibloc

Zur Anwendung der Warteschlangentheorie auf die Problemstellung von SIG Combibloc muss wie im vorigen Abschnitt beschrieben vorgegangen werden. Eine statistische Analyse vergangener Ankunfts- und Bedienzeiten an den unterschiedlichen Arbeitsplätzen sollte im besten Fall die Annahme einer statistischen Verteilung erlau-

⁸⁰ Vgl. Zimmermann (2008), S. 422 f.

⁸¹ Vgl. Nyuis/Wiendahl (2003), S. 294 f.

ben. Ansonsten müssen Modelle mit allgemeinen Verteilungen (G) für die Arbeitsplätze der verschiedenen Fertigungsstufen entwickelt werden.

Über die mittlere Wartezeit und die mittlere Verweildauer im System können die durchschnittlichen Warte- und Durchlaufzeiten eines Auftrags je Arbeitsplatz bestimmt werden. Durch Variationen des Auslastungsgrades kann die Auswirkung einer veränderten Belastung des Systems auf die entstehenden Durchlaufzeiten und somit die Lieferzeit untersucht werden.

Aus den bereits in Kapitel 3.2.4 erwähnten Gründen erweist sich die Betrachtung des Produktionsschrittes „Endfertigung“ bei SIG Combibloc am sinnvollsten.

3.5 Methodenauswahl

Die produktionslogistischen Zielgrößen verdeutlichen die konträren Ziele eines Unternehmens im wirtschaftlichen Umfeld. Einerseits soll eine hohe Liefertermintreue zur Zufriedenstellung der Kunden gewährleistet werden, andererseits soll aber möglichst wenig Bestand bevorratet werden, weil Bestand mit gebundenem Kapital gleichzusetzen ist. Um zwischen den Zielen einen Kompromiss zu finden, müssen die einzelnen Kennwerte in einem Unternehmen bekannt sein.

Durchlaufdiagramme und Produktionskennlinien bieten eine Hilfestellung zur Ausrichtung eines Unternehmens an den Zielgrößen. Aus den zeitabhängigen Durchlaufdiagrammen können die Zielgrößen abgelesen werden, in den bestandsabhängigen Produktionskennlinien können die Auswirkungen verschiedener Bestandsniveaus dargestellt werden.

Um in einem Unternehmen die verschiedenen Durchlaufdiagramme und Produktionskennlinien der einzelnen Arbeitssysteme zu ermitteln, werden arbeitsplatzspezifische Daten benötigt.

Für die Arbeitssysteme lassen sich damit Aussagen über den optimalen Auslastungsgrad zur Erreichung von hoher Termintreue treffen. Um diesen optimalen Auslastungsgrad zu ermitteln, muss in einem Unternehmen mit mehreren Produktionsstufen die Engpassstufe analysiert werden. Der so ermittelte Bestand ergibt die zulässige Auslastung der übrigen Stufen.

Mit Hilfe von Simulationsstudien lässt sich der Materialfluss eines Unternehmens nachstellen und durch verschiedene Parameteränderungen können Einflüsse auf die produktionslogistischen Zielgrößen überprüft werden. Das Modell liefert je nach dessen

Detailierungsgrad unterschiedlich genaue Informationen über die realen Abläufe in einem Unternehmen. Da bei höherer Detaillierung aber auch der Rechenaufwand steigt, muss ein Kompromiss zwischen diesen Anforderungen gefunden werden. Bei hinreichender Genauigkeit können demzufolge Auswirkungen von Änderungen am Simulationsmodell getestet werden, um sie bei positiver Beurteilung im Unternehmen umzusetzen.

Die genaue Reihenfolgebildung bei SIG Combibloc ist relativ schwierig zu modellieren, da vordergründig versucht wird, die Rüstkosten so gering wie möglich zu halten. Diese hängen, wie bereits erwähnt, von der Produktgröße und den Kartonverbänden der nacheinander hergestellten Produkte ab.

Mit Warteschlangenmodellen kann das betriebliche Geschehen unter gewissen Voraussetzungen ebenfalls abgebildet werden. Da die zu treffenden Annahmen, wie in Kapitel 3.4.3 erwähnt, in realen Unternehmen meist nicht vorzufinden sind, sind die Voraussetzungen genau auf ihre Erfüllung zu untersuchen.

Die folgende Tabelle stellt die Vor- und Nachteile der vorgestellten Methoden gegenüber, um eine Auswahl zu erleichtern.

Methode	Vorteile	Nachteile
Kennlinien- theorie	Leichte Überprüfung und ggf. Anpassung (in Grenzen)	Bezug nur auf ein Arbeitssystem
	Einfach zu lesen	Zusätzliche Verwendung anderer Methoden für die aktuelle Problemstellung
	Einfach zu interpretieren	Hoher Erstellungsaufwand, wenn auch einmalig
Simulation	Verbessertes Systemverständnis	Aufwendige Modellerstellung
	Sicherheitsgewinn	Überprüfung zum Teil schwierig
	Mehrere Lösungsvarianten auswählbar	Gefahr Modell für Realität zu halten → keine kritische Betrachtung
Warteschlangen- theorie	Einfache Anwendung	Getroffene Annahmen sind in Realität meist nicht anzutreffen
	Ableitung aus mathematischen Gesetzmäßigkeiten	Anpassung von einmal entwickelten Modellen ist sehr schwierig

Tabelle 1: Beurteilung der Analysemöglichkeiten

Die Auswahl einer der beschriebenen Methoden wird mit Hilfe der Nutzwertanalyse getroffen. Mit dieser wird jeder Methode i bezüglich verschiedener Kriterien j ein Nutzwert N zugewiesen, das Verfahren wird nach der folgenden Vorgehensweise durchgeführt:⁸²

- Im ersten Schritt wird für jedes Kriterium j ein Gewicht G festgelegt, die Summe aller Gewichte G_j muss einem gewissen Wert entsprechen. In der Literatur werden unterschiedliche Summen genannt, nach Götze werden vor allem die Werte 1 oder 100 als sinnvoll erachtet.⁸³ Für die folgende Nutzwertanalyse zur Bewertung der Analysemethoden wird die Summe der Gewichte auf 100 festgelegt.
- Als zweiter Schritt wird jede Methode i bezüglich jedes Kriteriums j mit einer Punktezahl bewertet, auch für die Punkteanzahl sind verschiedene Skalen möglich. In der folgenden Analyse können Punkte von 0 bis 10 vergeben werden, wobei 0 Punkte der Minimal- und 10 Punkte der Maximalbewertung entsprechen.
- Im dritten und letzten Schritt werden schließlich die Punktezahlen mit den jeweiligen Gewichten multipliziert und zum Nutzwert einer Methode i summiert.

Die Bildung des Nutzwerts aus Schritt drei erfolgt nach der folgenden Formel:⁸⁴

$$N_i = \sum_{j=1}^n G_j \cdot P_{ij}$$

mit: N_i ... Nutzwert Methode i

G_j ... Gewichtung Kriterium j

P_{ij} ... zugewiesene Punkte Methode i bezüglich Kriterium j

Die folgende Tabelle stellt die durchgeführte Nutzwertanalyse bei SIG Combibloc dar. Sowohl zur Gewichtung als auch zur Punkteverteilung wurde das Urteil von Mitarbeitern von SIG herangezogen. Die Punktebewertung der Nutzwertanalyse kann auf subjektiven Präferenzen beruhen, was in diesem Fall aber durch die Einbeziehung von Entscheidungsträgern der SIG von keiner großen Bedeutung ist.

⁸² Vgl. Adam (1996), S. 412 ff. und Götze (2008), S. 180 ff.

⁸³ Vgl. Götze (2008), S. 182

⁸⁴ Vgl. Adam (1996), S. 413

Kriterium	Gewichtung	Kennlinientheorie		Simulation		Warteschlangentheorie	
		Punkte	Teilnutzwert	Punkte	Teilnutzwert	Punkte	Teilnutzwert
Verständlichkeit der Ergebnisse und der Ergebnisfindung	30	7	210	7	210	5	150
Aussagekraft	30	10	300	10	300	10	300
Erstellungsaufwand	5	5	25	0	0	8	40
Anpassungsmöglichkeit	15	6	90	3	45	0	0
Aufwand zur Überprüfung der Ergebnisse	20	5	100	5	100	5	100
Summe	100		725		655		590

Tabelle 2: Nutzwertanalyse SIG Combibloc

Damit fällt die Entscheidung auf die Umsetzung der Kennlinientheorie. Die wichtigsten Gründe für die Entscheidungsfindung waren die einfache Lesbarkeit und die guten Interpretierungsmöglichkeiten der entwickelten Modelle.

Die Verwendung der Kennlinientheorie ergibt, dass auf weitere Methoden zurückgegriffen werden muss, um die gesamte Durchlaufzeit von SIG Combibloc erheben und Aussagen über die Lieferzeit treffen zu können.

4 Anwendung der Kennlinientheorie auf die Problemstellung von SIG Combibloc

Mit Hilfe der Kennlinientheorie wird die Produktionsstufe Endfertigung bei SIG Combibloc analysiert. Die Gründe für die Betrachtung dieses Fertigungsschrittes wurden in Kapitel 3.2.4 dargelegt. Zusammenfassend wird festgehalten, dass diese Fertigungsstufe den Engpass der Produktion darstellt und die Analyse anderer Stufen unter Umständen zu verfälschten Ergebnissen (zum Beispiel aufgrund von Vorproduktionen) führen würde.

Die Erstellung der Kennlinien wird wie in Kapitel 3.2 beschrieben durchgeführt, dazu müssen verschiedene Daten erhoben werden. Grundsätzlich müssen Daten eines genügend großen Zeitraums erhoben werden, um saisonale Schwankungen auszugleichen, also zumindest sämtliche Informationen eines Jahres.

An dieser Stelle sei noch darauf hingewiesen, dass die Bezeichnungen der Werke und Formate von SIG Combibloc verfälscht wiedergegeben werden, um eventuell sensible Daten nicht öffentlich zugänglich zu machen. Die folgende Tabelle zeigt die in den weiteren Analysen betrachteten Werke und Formate.

Werk	Format
A	p
B	q
C	r

Tabelle 3: Werke und Formate

4.1 Vorgangsweise

Um Aussagen über die gesamte Durchlaufzeit treffen zu können, müssen einige Annahmen getroffen werden, da nur der letzte Produktionsschritt mittels Kennlinien analysiert wird.

So muss die bereits vergangene Zeit von Auftragseingang bis zum Start der betrachteten Fertigungsstufe ermittelt werden. Diese Informationen lassen sich, wie auch die

übrigen benötigten Daten, für jeden Auftrag mit dem ERP-System⁸⁵ von SIG Combibloc erheben.

Aus den Kennlinien können Grenzwerte in Vorgabestunden berechnet werden, damit die Aufträge die vorher bestimmte maximale Durchlaufzeit nicht übersteigen.

Da die verschiedenen produzierten Volumina je Format (Produktmix) im Schnitt konstant bleiben, kann ein Faktor berechnet werden, der angibt wie viele Packungen je Stunde und Format produziert werden. Mit diesen Faktoren kann der Bestand am System wieder in Stück gerechnet werden, ohne für jedes Format und Volumen einzeln die Arbeitspläne zu betrachten. Damit kann die Menge an Fertigware, die auf Lager liegen muss, um die maximale Lieferzeit bei zu hohem Bestand an der Endfertigung einzuhalten, berechnet werden.

Weiters wird aus der Kennlinientheorie ein Betriebszustand ermittelt, der einen geeigneten Kompromiss zwischen den produktionslogistischen Zielgrößen darstellt. Ein globales Optimum wird mit dieser Methode nicht ermittelt. Dazu müsste ein Optimierungsverfahren, das sämtliche Nebenbedingungen von SIG Combibloc berücksichtigt, angewandt werden. Daher wird nicht ein einzelner Betriebspunkt, sondern ein Bereich, der die Ziele in angemessener Art erfüllt, angegeben.

Das Vorgehen ist in Abbildung 14 dargestellt und wird in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

⁸⁵ ERP steht für Enterprise Resource Planning, diese Systeme bilden unter anderem eine gemeinsame Datenbasis für Unternehmen, die von mehreren Benutzern gleichzeitig verwendet werden kann. Vgl. Klaus/Krieger (2008), S. 554

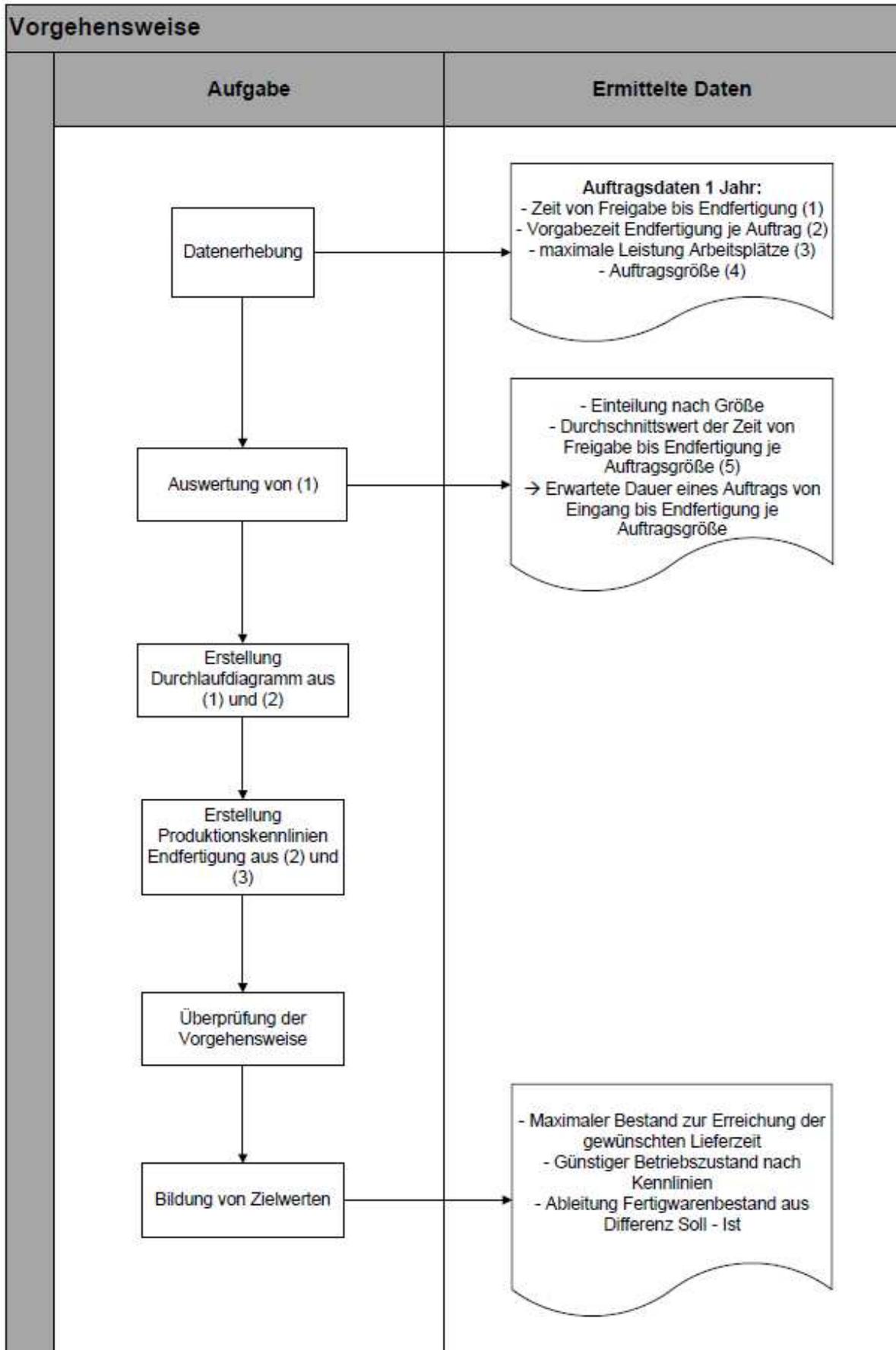


Abbildung 14: Vorgehensweise

4.2 Datenerhebung

In diesem Kapitel werden die in Abbildung 14 dargestellten, zu erhebenden Daten näher erläutert. Die Formeln zur Berechnung der Kennlinien aus diesen Daten sind Kapitel 3.2.2 zu entnehmen.

Um Bedarfsänderungen aufgrund saisonaler Schwankungen in die Berechnung des Variationskoeffizienten einzubeziehen werden sämtliche Auftragsdaten im Zeitraum eines Jahres erhoben.

Die vergangene Zeit eines Auftrags von dessen Bestelleingang bis zum Erreichen des Systems Endfertigung muss ermittelt werden, um über die Auswertung der Kennlinien Aussagen über die gesamte Durchlaufzeit treffen zu können. Dazu werden Durchschnittswerte verwendet, allerdings muss überprüft werden, inwiefern Aufträge unterschiedlicher Größenordnungen vergleichbar sind. Größere Aufträge benötigen mehr Zeit zur Bearbeitung, was durch die Verwendung der Schlupfzeitregel aber zumindest teilweise ausgeglichen wird. Da sehr große Aufträge dennoch ins Gewicht fallen, muss geprüft werden, ob Durchschnittswerte verwendet werden können. Bei SIG Combibloc werden, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, zuerst Kartonrollen beschichtet und dann bedruckt, die Auftragsgröße kann daher in Rollen angegeben werden. Wenn Kunden abweichende Mengen bestellen, werden zwar beispielsweise auch halbe Rollen produziert, in der Regel werden aber ganze Rollen gefertigt. Zur Ermittlung der durchschnittlich vergangenen Zeit von Auftragseingang bis zum Eingang ins System Endfertigung werden die Aufträge je nach zu produzierender Rollenanzahl zur Überprüfung gesondert betrachtet.

Für die Berechnung des mittleren Bestands der Kennlinien ist die Kenntnis des idealen Mindestbestands erforderlich. Für diesen wiederum werden die Zeiten zur Erledigung eines Auftrags (Auftragszeiten) am Arbeitsplatz benötigt. Diese können bei SIG aus den Arbeitsplänen der einzelnen Produkte gewonnen werden. Die Arbeitspläne werden in regelmäßigen, kurzen Abständen überprüft und gegebenenfalls angepasst, zum Beispiel wenn sich der Leistungsgrad von Anlagen ändert.

Für die Leistungskennlinie wird die maximal mögliche Leistung der Arbeitssysteme benötigt. Diese lässt sich für jede Maschine zum einen aus dem Schichtplan und zum

anderen aus dem technischen Nutzen⁸⁶ (Leistungsgrad) der Anlagen errechnen. Wird ein Format an mehreren Einzelmaschinen produziert, die aber zu einer Linie zusammengefasst werden, können die einzelnen Leistungsdaten addiert werden, um die gesamte maximale Leistung zu ermitteln.

Um in einem weiteren Schritt aus der Durchlaufzeit auf die Lieferzeit schließen zu können, wird die Zeitdauer benötigt, welche die Aufträge von Fertigstellung bis zum Kunden benötigen. Diese Zeit kann, wie in den Eingrenzungen (Kapitel 1.2) erläutert, als konstant angenommen werden. Um eine Lieferzeit von insgesamt drei Wochen zu erreichen, wird eine Produktionsdurchlaufzeit bis Ende des Produktionsschrittes Endfertigung von zwei Wochen angestrebt. Für eine mögliche Qualitätsendkontrolle, Kommissionierung, Verpackung und Versand wird somit eine Woche reserviert.

4.3 Datenauswertung

Die Auswertung der erhobenen Daten umfasst vor allem die Einteilung der Aufträge nach deren Größe. Betrachtet werden die häufigsten 95% aller Aufträge des erfassten Zeitraums. Die übrigen 5% bestehen aus einer Vielzahl von verschiedenen Auftragsgrößen. Zum Beispiel wurde in Werk A im erfassten Zeitraum nur ein Auftrag mit der Größe von 70 Rollen platziert aber beinahe 2.700 Aufträge, die zwei Rollen umfassen. Solche seltenen und sehr großen Aufträge werden nicht in die Betrachtung einbezogen, da sich auch die angestrebte Lieferzeit nicht auf Bestellungen dieser Größenordnung bezieht.

Die folgende Einteilung der Aufträge nach der Anzahl der produzierten Rollen wird im Folgenden kurz Größeneinteilung genannt. Der Zeitraum der betrachteten Daten beträgt, wie bereits erwähnt, genau ein Jahr, vom 1.11.2010 bis zum 31.10.2011. In den folgenden Tabellen wird die Zeit von Freigabe des Auftrags bis zur Erreichung des Systems Endfertigung angegeben. Aufträge werden bei SIG Combibloc in der Regel an einem Tag zu Beginn der Woche während der sogenannten Wochenplanung freigegeben. Dieser Umstand führt dazu, dass ein Kundenauftrag, wenn dieser nicht an diesem Tag eingegangen ist, bis zu dessen Freigabe eine gewisse Zeit warten muss. Im Schnitt kann diese Wartezeit mit 4 Tagen angegeben werden und muss demzufolge noch zur Zeitspanne von Freigabe bis Endfertigung addiert werden. Es kann zwar durchaus vorkommen, dass ein Auftrag bis zu dessen Freigabe länger war-

⁸⁶ Der technische Nutzen ist bei SIG Combibloc mit dem Anteil der reinen Produktionszeit an der geplanten Betriebszeit definiert. Zur korrekten Ermittlung der maximalen Leistung müssen neben dieser Definition auch die Rüstzeiten berücksichtigt werden, im weiteren Verlauf der Arbeit wird im technischen Nutzen auch die Rüstzeit berücksichtigt.

ten muss als die benannten 4 Tage, da aber in dieser Arbeit Grenzwerte ermittelt werden sollen, kann dieser Wert als konstant angenommen werden. Eine längere Wartezeit kommt zum Beispiel dann vor, wenn ein Kunde die bestellte Ware zu einem späteren Zeitpunkt wünscht. Ein weiterer möglicher Grund ist, dass der bestätigte Liefertermin wegen zu hoher Auslastung der Produktion weiter als üblich in der Zukunft liegt und ein Auftrag darum nicht in der nächsten Wochenplanung zur Produktion freigegeben wird. In diesem Fall liegt ein zu hoher Bestand in den Arbeitssystemen der Produktion vor, der bei Einhaltung der im Anschluss ermittelten Grenzwerte vermieden wird.

Tabelle 4 zeigt die Einteilung der durchschnittlich vergangenen Zeit von Freigabe bis Endfertigung in Werk A. Die besagten vier Tage wurden addiert und in die Spalte „Durchschnittliche Zeit von Eingang bis Endfertigung“ eingetragen.

Rollenanzahl	Durchschnittliche Zeit von Freigabe bis Endfertigung	Durchschnittliche Zeit von Eingang bis Endfertigung	Anzahl Aufträge	Anteil am gesamten Auftragsvolumen	Anteil kumuliert
1	7,0	11,0	1870	25,49%	25,49%
2	6,9	10,9	2683	36,57%	62,06%
3	7,0	11,0	1395	19,02%	81,08%
4	7,1	11,1	230	3,14%	84,21%
5	6,7	10,7	396	5,40%	89,61%
7	6,9	10,9	229	3,12%	92,73%
8	7,1	11,1	95	1,29%	94,03%
10	6,8	10,8	71	0,97%	95,00%

Tabelle 4: Größeneinteilung Werk A

Die Anwendung der Schlupfzeitregel bewirkt, dass der Unterschied zwischen den Durchlaufzeiten der verschiedenen Größen gering ausfällt und dass kein ansteigender Trend mit steigender Rollenanzahl festzustellen ist. Außerdem ist zu beobachten, dass sich die Mehrzahl der Aufträge auf nur wenige Größen verteilt.

In Werk B sieht die Einteilung ähnlich aus, es ist allerdings eine etwas höhere Schwankungsbreite festzustellen. Außerdem ist die Konzentration auf gewisse Rollenzahlen nicht so stark ausgeprägt wie in Werk A, was dazu führt, dass mehrere verschiedene Größen zu den häufigsten 95% zählen.

Rollenanzahl	Durchschnittliche Zeit von Freigabe bis Endfertigung	Durchschnittliche Zeit von Auftragseingang bis Endfertigung	Anzahl Aufträge	Anteil am gesamten Auftragsvolumen	Anteil kumuliert
1	7,7	11,7	2002	28,29%	28,29%
2	7,7	11,7	1355	19,15%	47,44%
3	7,5	11,5	1202	16,99%	64,43%
4	7,8	11,8	529	7,48%	71,91%
5	7,6	11,6	354	5,00%	76,91%
6	7,4	11,4	537	7,59%	84,50%
7	7,2	11,2	308	4,35%	88,85%
8	8,4	12,4	158	2,23%	91,08%
9	7,6	11,6	127	1,79%	92,88%
10	7,5	11,5	98	1,38%	94,26%
11	9,4	13,4	61	0,86%	95,12%

Tabelle 5: Größeneinteilung Werk B

In Werk C ist sowohl die Schwankungsbreite der Durchlaufzeit als auch der Größenunterschied der verschiedenen Auftragsgrößen ausgeprägter als in den zuvor betrachteten Werken. Hier ist keine wesentliche Konzentration auf wenige Größen feststellbar. Der höchste Anteil einer Größe am gesamten Auftragsvolumen des Bezugszeitraums beträgt hier lediglich 13% im Vergleich zu 28% in Werk B und sogar 36% in Werk A.

Rollenanzahl	Durchschnittliche Zeit von Freigabe bis Endfertigung	Durchschnittliche Zeit von Eingang bis Endfertigung	Anzahl Aufträge	Anteil am gesamten Auftragsvolumen	Anteil kumuliert
1	4,8	8,8	58	4,05%	4,05%
2	6,0	10,0	182	12,70%	16,75%
3	5,5	9,5	191	13,33%	30,08%
4	5,8	9,8	109	7,61%	37,68%
5	6,8	10,8	141	9,84%	47,52%
6	5,7	9,7	86	6,00%	53,52%
7	5,5	9,5	98	6,84%	60,36%
8	5,0	9,0	58	4,05%	64,41%
9	6,1	10,1	75	5,23%	69,64%
10	7,3	11,3	44	3,07%	72,71%
11	5,6	9,6	73	5,09%	77,81%
12	6,4	10,4	101	7,05%	84,86%
14	6,1	10,1	30	2,09%	86,95%
15	5,4	9,4	59	4,12%	91,07%
16	5,9	9,9	16	1,12%	92,18%
18	7,2	11,2	31	2,16%	94,35%
24	7,8	11,8	19	1,33%	95,67%

Tabelle 6: Größeneinteilung Werk C

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Aufträge in den Werken A und B auf wenige unterschiedliche Größen konzentrieren, in Werk C ist diese Konzentration schwächer ausgeprägt.

In den Werken A und B sind die durchschnittlichen Zeiten der einzelnen Auftragsgrößen sehr ähnlich, die Verwendung eines Durchschnittswertes aller Größen weist damit eine ausreichend hohe Genauigkeit auf.

In Werk C ist die Schwankungsbreite höher, manche Größen werden nur durch eine relativ geringe Anzahl von Aufträgen repräsentiert. Für die Entscheidung, ob ein Durchschnittswert verwendet werden kann oder nicht, müssen für dieses Werk die Auftragsdaten eines längeren Zeitraums erhoben werden. In den Kapiteln 4.5 und 4.6.1 wird jedoch gezeigt, dass sich eine umfangreiche Datenerhebung zum aktuellen Zeitpunkt nicht als notwendig erweist.

4.4 Erstellung der Durchlaufdiagramme

Für die Durchlaufdiagramme werden die Zu- und Abgänge der Endfertigung der betrachteten Linien (Formate) in Vorgabestunden benötigt. Diese wurden über die entsprechenden Arbeitspläne aus vergangenen Aufträgen ermittelt. Der Anfangsbestand wird durch die Vorgabestunden der Aufträge gebildet, die vor dem 1.11.2010 ins System gelangt, aber erst im Laufe des 1.11. oder später abgeschlossen wurden.

Aus den Durchlaufdiagrammen lassen sich die mittlere Leistung und die mittlere Belastung der Arbeitssysteme berechnen. Die mittlere Leistung entspricht dem durchschnittlichen Abgang, die mittlere Belastung dem durchschnittlichen Zugang. Abbildung 15 zeigt das Durchlaufdiagramm des Werkes A für Dezember 2010. Die Abgangslinie startet in dieser Darstellung nicht wie üblich im Ursprung der vertikalen Bezugsachse, da das Diagramm für den vollständigen Bezugszeitraum eines Jahres erstellt wurde. Aus Gründen der besseren Darstellbarkeit wurde für die Abbildung aber lediglich der Zeitraum eines Monats gewählt.

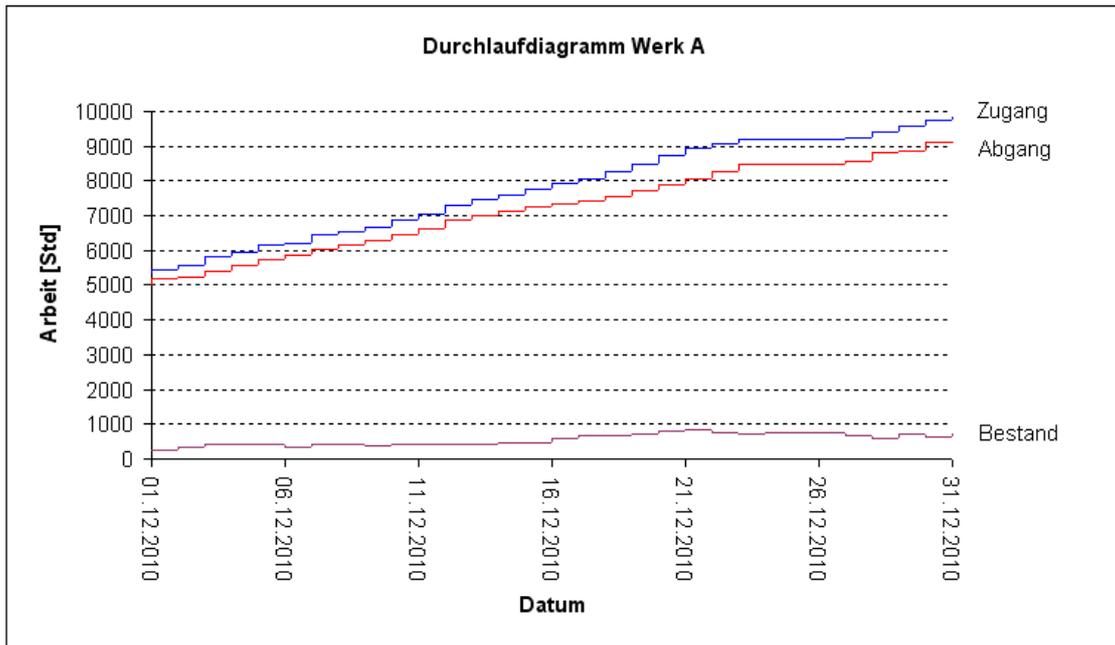


Abbildung 15: Durchlaufdiagramm Werk A

Über den gesamten beobachteten Zeitraum können sowohl eine mittlere Belastung als auch eine mittlere Leistung von rund 160 Stunden pro Betriebskalendertag ermittelt werden. Daher kommt es im betrachteten Zeitraum zu keiner erheblichen Bestandsanhäufung, das System wird im Gleichgewicht betrieben.

Die folgende Abbildung zeigt das Durchlaufdiagramm für Werk B, auch hier wurde der Betrachtungszeitraum auf Dezember 2010 eingeschränkt.

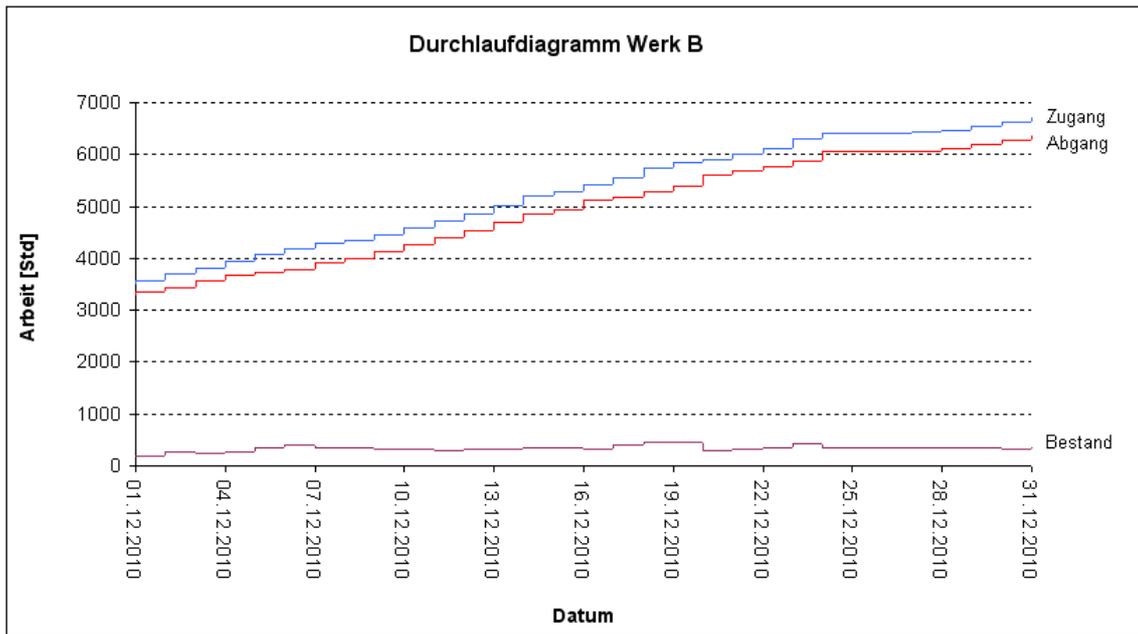


Abbildung 16: Durchlaufdiagramm Werk B

Für Werk B betragen mittlere Leistung und mittlere Belastung 120 Stunden. Die Kapazität, die zur Produktion dieses Formats benötigt und aufgewandt wird, ist demzufolge geringer als im zuvor betrachteten Werk A.

Abbildung 17 zeigt das Durchlaufdiagramm für Werk C. Hier betragen mittlere Leistung und mittlere Belastung je 89 Stunden, demzufolge ergibt sich im betrachteten Zeitraum keine relevante Bestanderhöhung. Zu Beginn ist zu sehen, dass ein relativ hohes Bestandsniveau herrscht, in weiterer Folge sinken allerdings die Zugänge im Verhältnis zu den Abgängen und der Bestand sinkt.

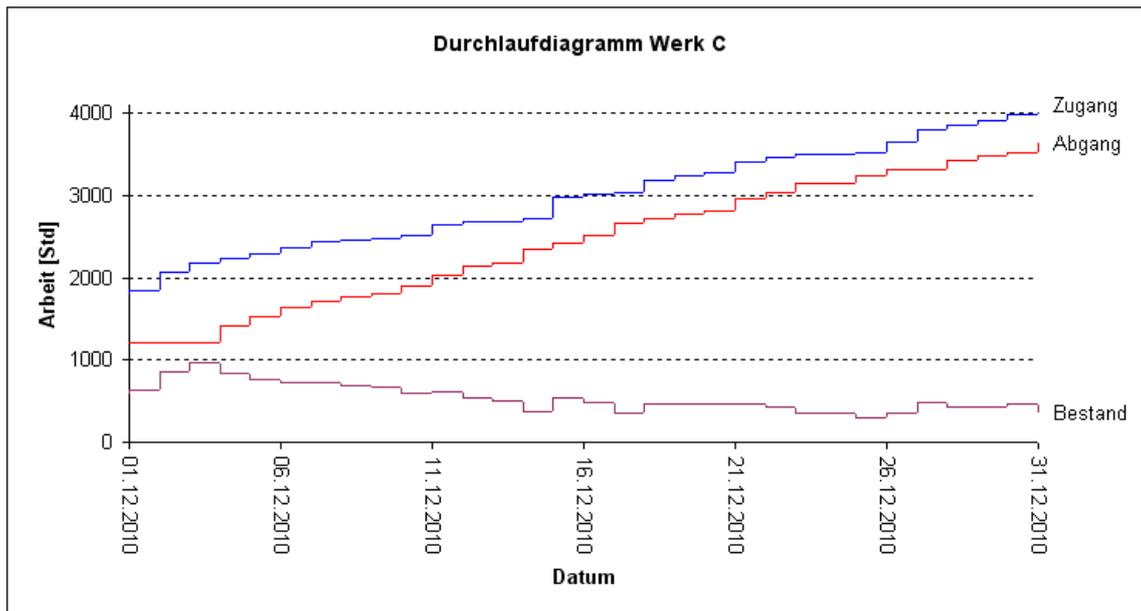


Abbildung 17: Durchlaufdiagramm Werk C

Durch die Reihenfolgebildung mittels Schlupfzeitregel kann die Durchlaufzeit nicht direkt aus den Durchlaufdiagrammen abgelesen werden, die einzelnen Aufträge müssten dazu im Diagramm aufgetragen werden.

Im folgenden Kapitel werden die Produktionskennlinien für die benannten Werke und Formate dargestellt.

4.5 Erstellung der Produktionskennlinien

Aus der maximal möglichen Leistung des Arbeitssystems wird die Leistungskennlinie gebildet und als Funktion des Bestands dargestellt. Sie wird aus dem Schichtplan und dem technischen Nutzen der Maschinen gebildet.

Die Reichweitenkennlinie wird direkt aus Leistung und Bestand mit der Trichterformel berechnet, dazu sind also keine weiteren Daten erforderlich.

Die Reihenfolgebildung für den Produktionsschritt Endfertigung erfolgt mittels Schlupfzeitregel, die Durchlaufzeitkennlinie kann daher mit den Formeln aus Kapitel 3.2.2 entwickelt werden⁸⁷ und ist zur Reichweitenkennlinie parallel. Aus den Vorgabewerten für die Produktion, die auch zur Errechnung des idealen Mindestbestands benötigt werden, muss dafür der Variationskoeffizient der Auftragszeiten berechnet werden.

⁸⁷ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 147

Für den Streckfaktor kann als Standardwert $\alpha = 10$ verwendet werden. Die Endfertigung von SIG Combibloc besteht jedoch aus mehreren parallel betriebenen Linien. Die verfügbare Kapazität muss also geteilt werden, die ankommenden Aufträge liegen nicht vor einer einzelnen Anlage im Wartebestand, sondern teilen sich auf die einzelnen Linien auf. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, wird der Streckfaktor durch die Anzahl der Linien geteilt.⁸⁸

Tabelle 7 zeigt die für Werk A berechneten Daten zur Erstellung der Produktionskennlinien. In Werk A wird das Format p mit drei parallel betriebenen Linien gefertigt.

B_{min}	171,4 [Std]
L_{max}	160,8 [Std/BKT]
α	3,33333333 -
Variationskoeffizient	1,06 -
Technischer Nutzen	67 %

Tabelle 7: Daten zur Erstellung der Produktionskennlinien Werk A

Die Produktionskennlinien von Werk A sind in Abbildung 18 zu sehen, die roten Kennzeichnungen sind Messpunkte zur Überprüfung der Durchlaufzeitkennlinie.

⁸⁸ Vgl. Nyhuis/Wiendahl (2003), S. 147

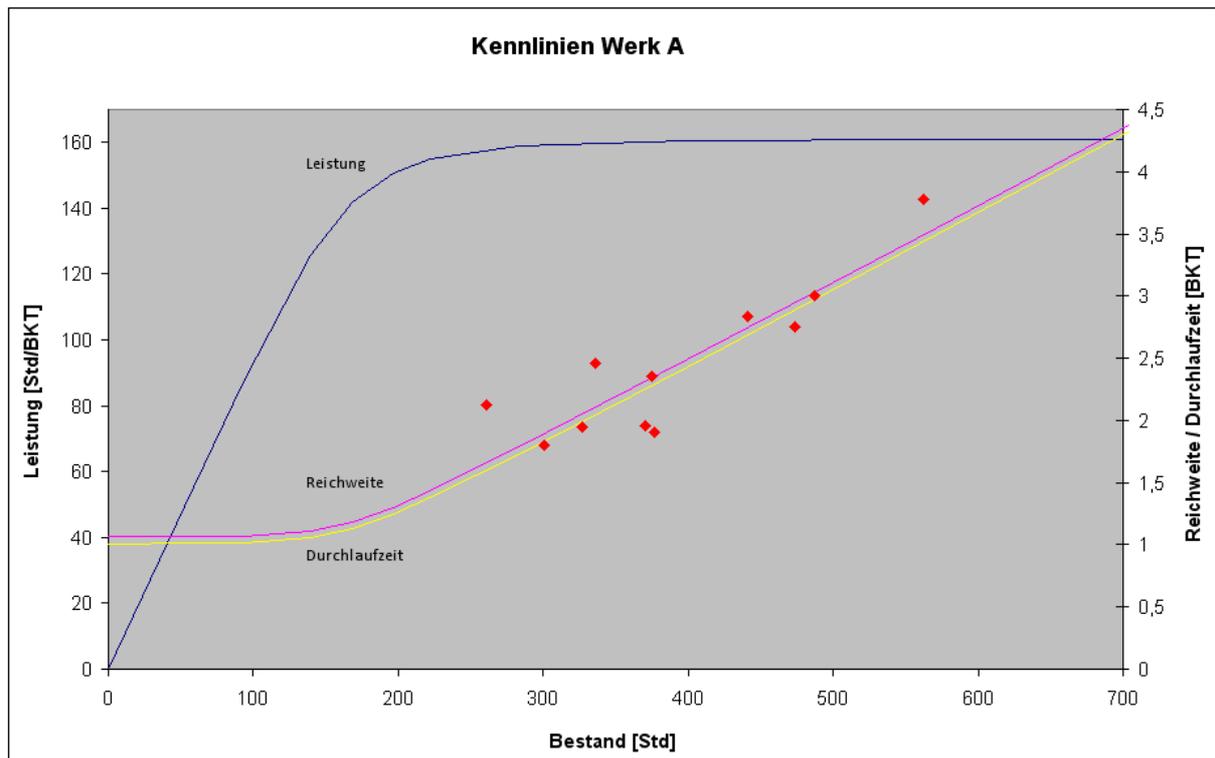


Abbildung 18: Kennlinien Werk A

Der geringe Abstand zwischen Reichweiten- und Durchlaufzeitkennlinie weist auf eine geringe Streuung der Auftragszeiten hin. Da die Auftragszeiten hier aus den Arbeitsplänen entnommen werden und sämtliche Aufträge ein Format betreffen, stammt diese Streuung lediglich aus Veränderungen der Auftragsgrößen und der produzierten Volumina.

Um die Durchlaufzeit der Endfertigung zum Beispiel geringer als 2,5 Tagen zu halten, muss der Bestand unter ungefähr 400 Stunden liegen. Durch den proportionalen Anstieg der Durchlaufzeit bei steigendem Bestand werden relativ schnell hohe Werte erzielt.

Für Werk B zeigt die folgende Tabelle die verwendeten Daten zur Berechnung der Produktionskennlinien.

B_{lmin}	99,4 [Std]
L_{max}	131 [Std/BKT]
α	5 -
Variationskoeffizient	1,13 -
Technischer Nutzen	78 %

Tabelle 8: Daten zur Erstellung der Produktionskennlinien Werk B

Abbildung 19 zeigt die Produktionskennlinien für Werk B. In diesem Werk werden zwei Linien zur Produktion des betrachteten Formats verwendet, daher wird der Streckfaktor mit $\alpha = 5$ angegeben. Auch in diese Kennlinie werden Messpunkte eingetragen, um die Übereinstimmung mit real gemessenen Werten zu zeigen.

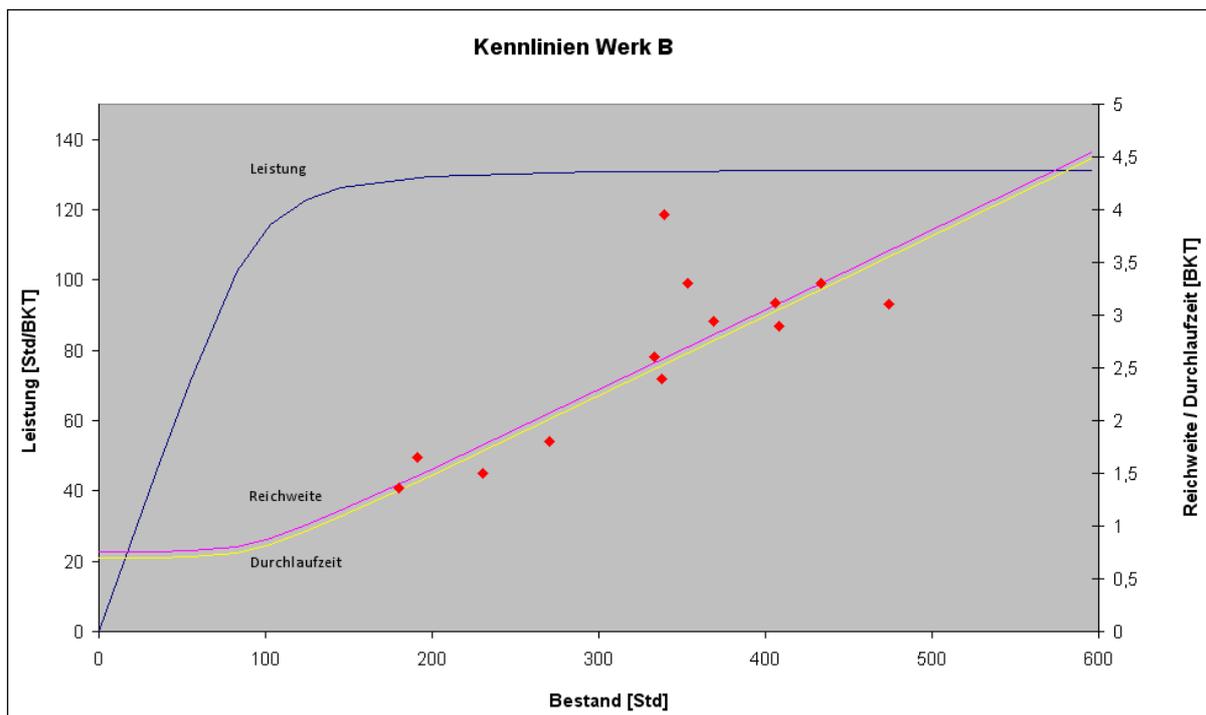


Abbildung 19: Kennlinien Werk B

Tabelle 9 zeigt die verwendeten Daten zur Erstellung der Kennlinien für Werk C, in Abbildung 20 werden die Kennlinien schließlich dargestellt. Auch hier wird mit zwei Linien produziert.

B_{lmin}	166,3 [Std]
L_{max}	114,2 [Std/BKT]
α	5 -
Variationskoeffizient	1,13 -
Technischer Nutzen	68 %

Tabelle 9: Daten zur Erstellung der Produktionskennlinien Werk C

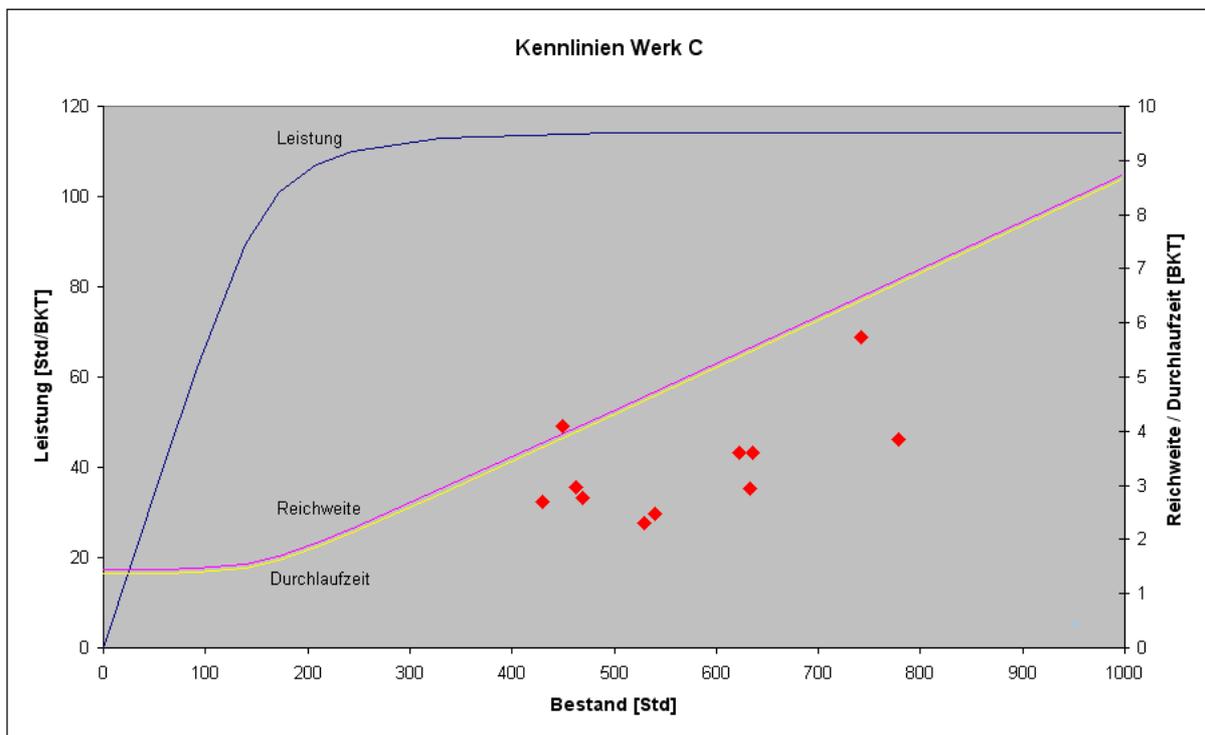


Abbildung 20: Kennlinien Werk C

Hier ist die Übereinstimmung zwischen Kennlinien und Ist-Durchlaufzeiten sehr gering. Gründe hierfür können sein, dass die Arbeitspläne von Werk C nicht auf aktuellen Stand gebracht wurden und die Produktionsplanung in diesem Werk auf eine andere Weise durchgeführt wird. Eine weitere mögliche Erklärung ist, dass die Leistung im angegebenen Zeitraum die angegebene um 30 - 40% überstieg. Wird die Leistung entsprechend angepasst, wird eine hohe Übereinstimmung mit den gemessenen Betriebspunkten erreicht. Da aber beide Erklärungen zutreffen könnten und die Urs-

chen noch nicht hinreichend geklärt wurden, können die Kennlinien zum aktuellen Zeitpunkt nicht korrekt erstellt werden.

4.6 Überprüfung der Vorgehensweise

Die Überprüfung der Vorgehensweise besteht aus zwei wesentlich Schritten. Zuerst werden die Produktionskennlinien auf ihre Gültigkeit überprüft. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf die Durchlaufzeitkennlinie gelegt, da diese für die Problemstellung der Arbeit eine wesentliche Rolle spielt.

Im darauf folgenden Abschnitt wird sichergestellt, dass sich die Betrachtung der Fertigungsstufe Endfertigung bei SIG Combibloc als korrekt erweist.

4.6.1 Überprüfung der Produktionskennlinien

Zur Überprüfung der Kennlinien werden die Ist-Durchlaufzeiten der Endfertigung mit den Soll-Werten, die sich aus der Kennlinie ergeben, verglichen. Dazu wird der mittlere Bestand jedes der betrachteten Monate herangezogen und jene Durchlaufzeitwerte ermittelt, die nach Kennlinie bei diesem Bestand eintreffen müssten.

Dieser Vergleich wird für die betrachteten Werke und Formate in den folgenden Abbildungen grafisch dargestellt, beginnend mit Werk A.

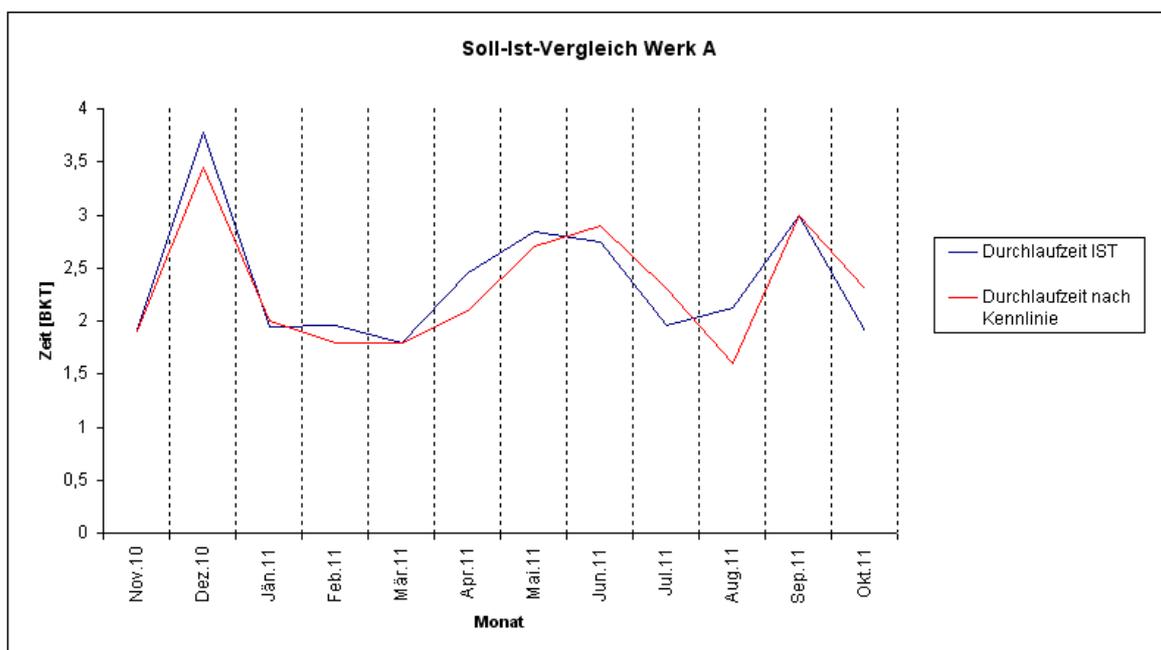


Abbildung 21: Überprüfung Durchlaufzeitkennlinie Werk A

Abbildung 21 zeigt, dass die gemessenen Werte sehr gut mit den Kennlinienwerten übereinstimmen.

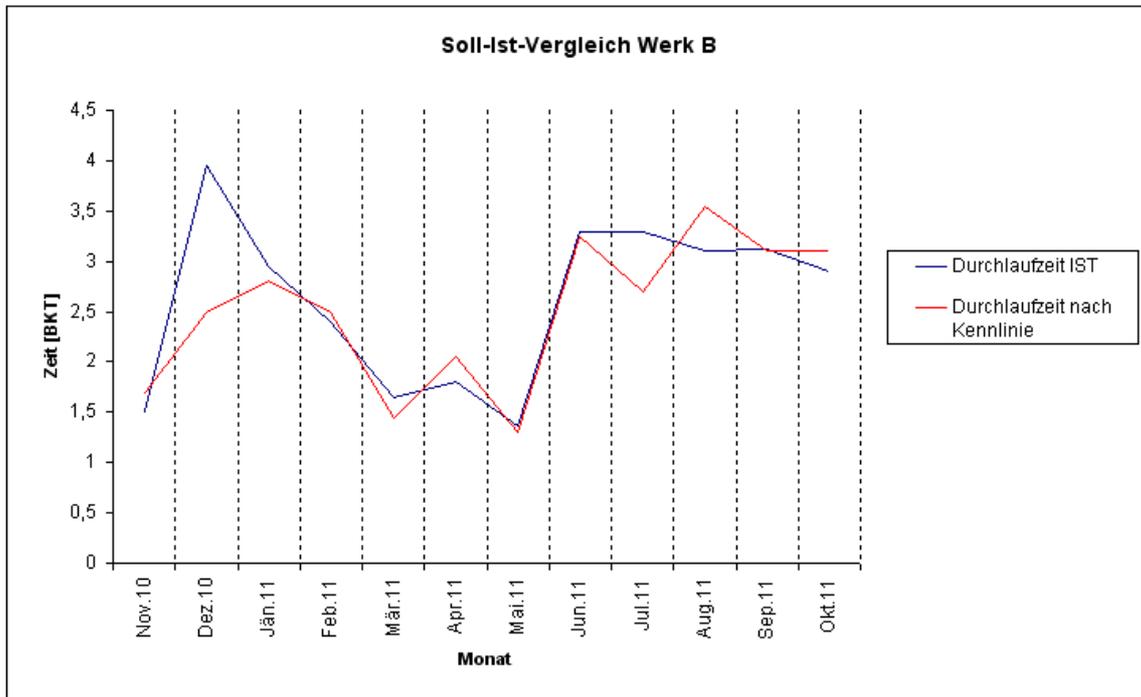


Abbildung 22: Überprüfung Durchlaufzeitkennlinie Werk B

Auch hier stimmen die verglichenen Zeiten gut überein, einzig große Abweichung ist im Dezember 2010 zu beobachten.

An den Kennlinien aus Abbildung 20 war bereits zu beobachten, dass die Durchlaufzeiten in Werk C nicht mit den Werten der Durchlaufzeitkennlinie übereinstimmen.

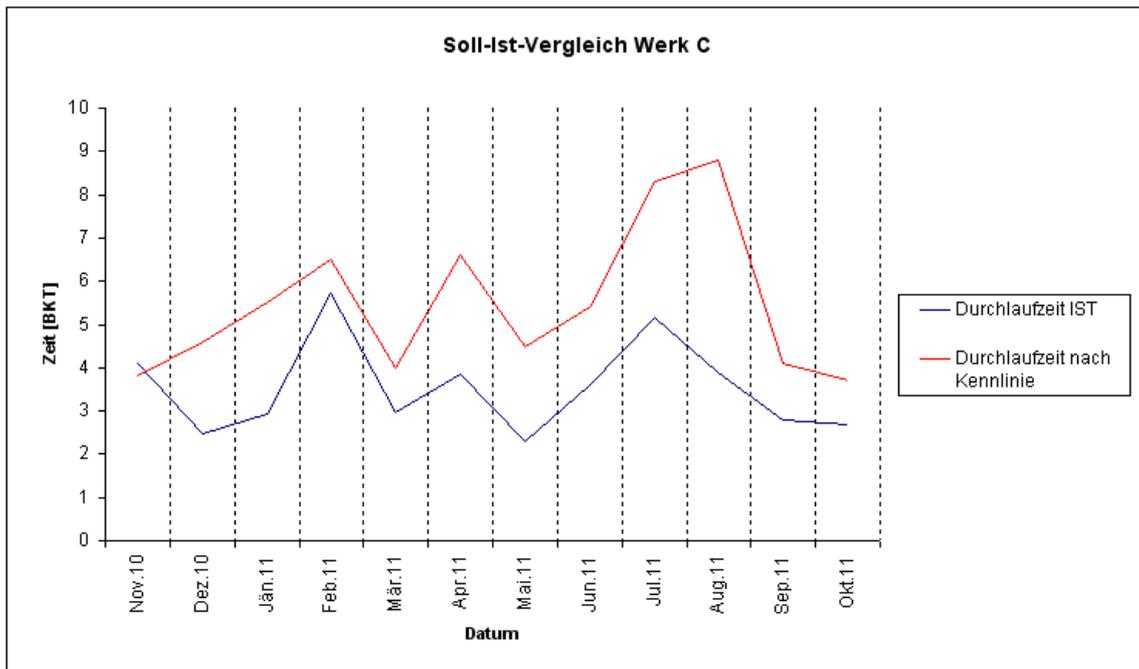


Abbildung 23: Überprüfung Durchlaufzeitkennlinie Werk C

Wie bereits in Kapitel 4.5 erwähnt, müssen die Daten für Werk C angepasst werden, um korrekte Produktionskennlinien erstellen zu können. Hier ist zu sehen, dass der Trend zwischen Ist-Durchlaufzeit und den Werten der Kennlinie durchaus übereinstimmt. Ohne Bereinigung der Leistungsdaten oder der Arbeitspläne sind weitere Analysen jedoch nicht zielführend.

4.6.2 Überprüfung der Betrachtung der Fertigungsstufe Endfertigung

In diesem Schritt wird die Durchlaufzeit der Endfertigung mit der gesamten Durchlaufzeit verglichen. Deckt sich der Verlauf zwischen diesen beiden Werten kann davon ausgegangen werden, dass die betrachtete Fertigungsstufe der Engpass der Produktion ist, somit erweist sich die durchgeführte Betrachtung der Endfertigung als korrekt.

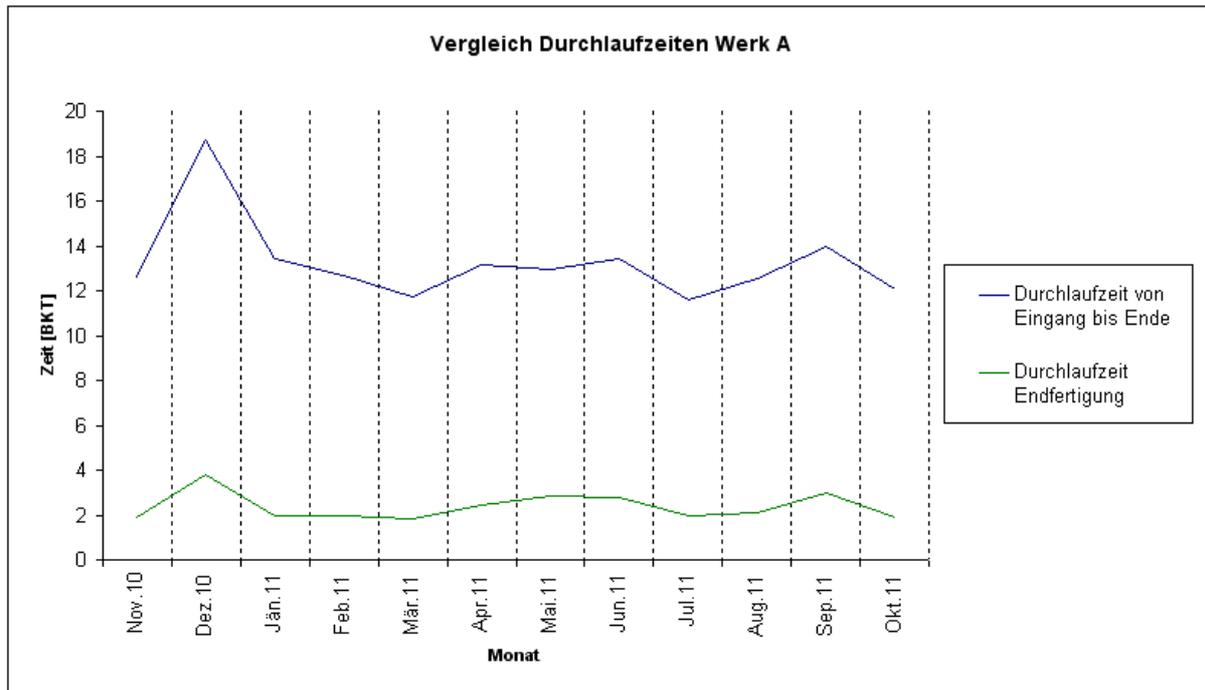


Abbildung 24: Durchlaufzeit gesamt und Durchlaufzeit Endfertigung Werk A

Der Verlauf der beiden Kurven weist eine hohe Übereinstimmung auf, es kann also von einer korrekten Betrachtung ausgegangen werden. Der Abstand zwischen der Kurve für die Durchlaufzeit der Endfertigung und jener der gesamten Durchlaufzeit ist zwar nicht konstant, dies ist auch nicht erforderlich. Der Grundsatz, dass bei höherem Bestand am Arbeitssystem eine höhere Durchlaufzeit anzunehmen ist⁸⁹, gilt auch für die vorigen Produktionsstufen. Wenn daher in einem Monat an der Endfertigung ein hohes Bestandsniveau herrscht, wird dies auch für die übrigen Stufen zu beobachten sein, von einer erhöhten Durchlaufzeit ist auszugehen.

⁸⁹ Siehe Erklärung der Durchlaufzeitkennlinie in Kapitel 3.2.2

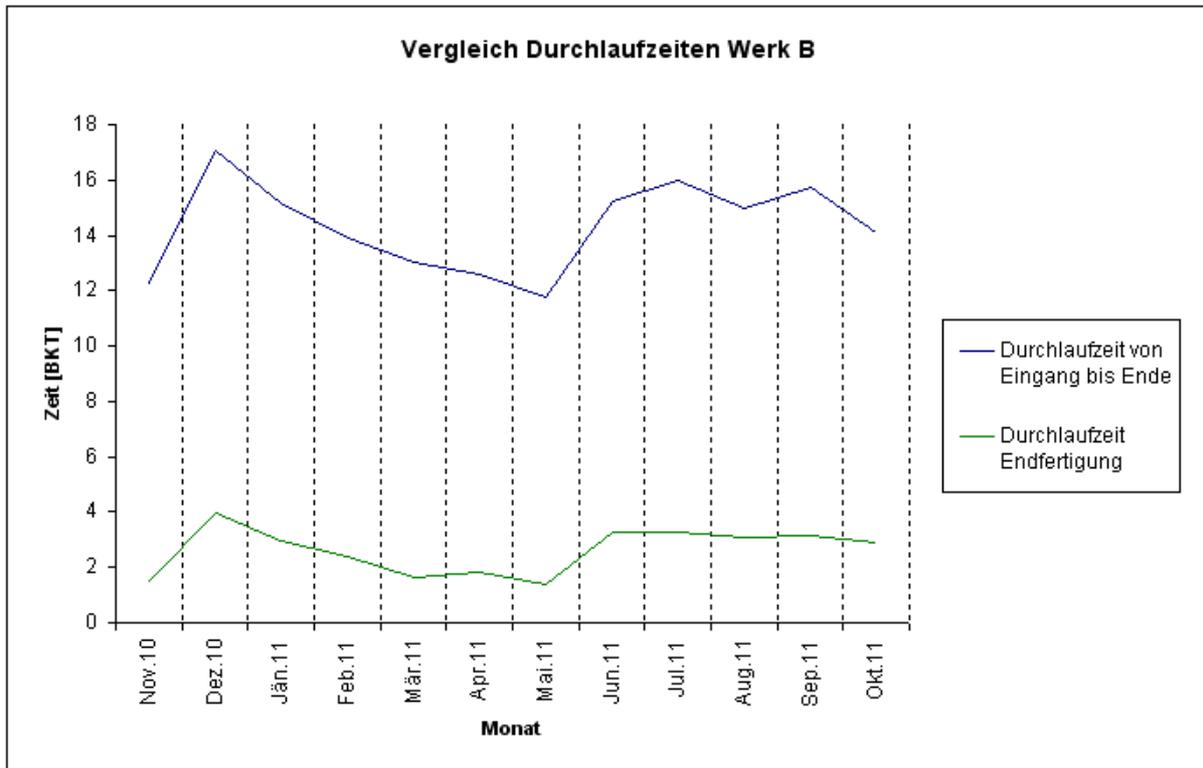


Abbildung 25: Durchlaufzeit gesamt und Durchlaufzeit Endfertigung Werk B

Auch in Werk B wird eine hohe Übereinstimmung erreicht, daher kann auch hier von einer korrekten Betrachtung ausgegangen werden.

Für Werk C wird diese Analyse nicht durchgeführt. Eine Übereinstimmung des Verlaufs der beiden Kurven wäre zwar auch hier zu erwarten, da aber die Produktionskennlinien auf fehlerhaften Daten basieren, macht eine weitere Betrachtung zu diesem Zeitpunkt keinen Sinn.

4.7 Zielwerte

Die Zielwertbildung der erstellten Kennlinien wird in zwei Teilbereiche gegliedert. Zum einen wird ein Höchstwert für den Bestand je Werk ermittelt, um die Lieferzeit von drei Wochen einhalten zu können.

Zum anderen werden durch günstige Betriebspunkte aus der Kennlinientheorie mögliche Potentiale aufgezeigt. Die Definition eines idealen Betriebszustandes muss je nach Zielsetzung unterschiedlich betrachtet werden. Für jede der produktionslogistischen Kenngrößen kann ein anderer optimaler Betriebspunkt gefunden werden. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel ein für SIG Combibloc anzustrebender Kompromiss der Zielgrößen genannt.

Um die Lieferzeit von drei Wochen einzuhalten, wird, wie am Ende von Kapitel 4.2 erklärt, eine Durchlaufzeit von zwei Wochen angestrebt. Die Kennzahl Durchlaufzeit bezieht sich in diesem Zusammenhang von vier Tagen vor Freigabe des Auftrags (Erklärung in Kapitel 4.3) bis zum Abschluss der Fertigungsstufe Endfertigung.

Nach Ermittlung der Zielwerte werden die so ermittelten Betriebspunkte für die betrachteten Werke gegenübergestellt und hinsichtlich ausgewählter Kennzahlen verglichen. Zusätzlich wird der Betriebspunkt, der sich aus Reduzierung des Bestands im System bis zur Erreichung des errechneten idealen Mindestbestands (BI_{min}) ergibt, in den Vergleich einbezogen. Der ideale Mindestbestand stellt die Untergrenze des Bestands dar, wenn große Auslastungsverluste vermieden werden sollen.

4.7.1 Bestandsgrenzwerte zur Einhaltung der Lieferzeit

In Werk A kann im Schnitt von einer Zeit von Eingang bis Endfertigung von rund 11 Tagen ausgegangen werden (siehe Tabelle 4). Es dürfen also maximal 3 Tage durch den Produktionsschritt Endfertigung hinzukommen. Dies entspricht in etwa einem Bestand von 495 Stunden.

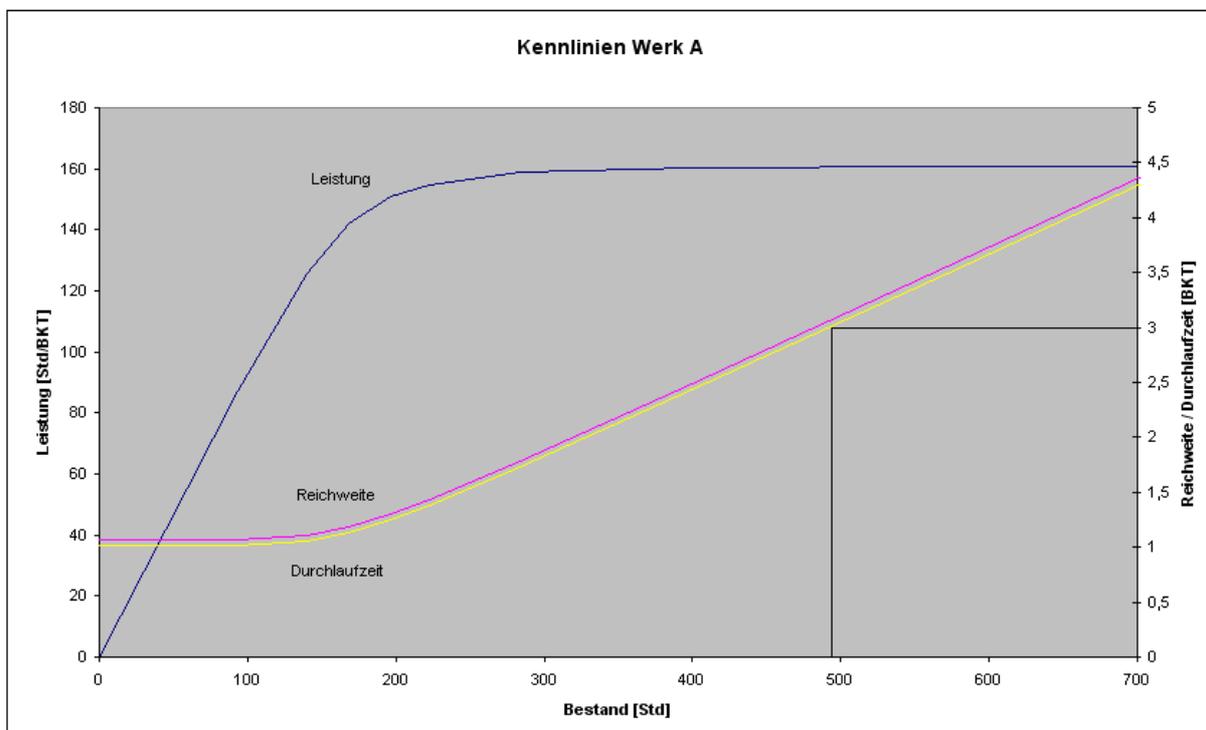


Abbildung 26: Maximalbestand Werk A

Um die Werte zu normieren und zu einer maximalen Auslastung zu gelangen, wird die Verfügbarkeit des Personals abzüglich der Pausen als geplante Betriebszeit angenommen. Wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben wurde, ist unter dem Grad der Kapazitätsauslastung das Verhältnis zwischen Zeit für Fertigung und Rüsten zur geplanten Betriebszeit zu verstehen. In den Werken A und B beträgt der Maximalwert 22,5 Stunden pro Betriebskalendertag bei Dreischichtbetrieb. Zur Berechnung der geplanten Betriebszeit müssen geplante Stillstände von der Planbelegungszeit abgezogen werden, für diese allgemeine Betrachtung wird dieser Umstand vernachlässigt. Für die konkrete Zielwertbildung einzelner Perioden müssen mögliche Stillstände jedoch eingerechnet und die Kapazität dementsprechend reduziert werden.

Für die geplante Betriebszeit werden also 22,5 Stunden pro Betriebskalendertag und Maschine angenommen. Die maximal mögliche Zeit, die für Produktion inklusive Rüsten verwendet werden kann, ergibt sich aus der maximalen Leistung. Der maximale Auslastungsgrad für Werk A beträgt demzufolge 71,5%.

In Werk B beträgt die Zeitspanne von Eingang eines Auftrages bis zu dessen Erreichen des Produktionsschritts Endfertigung im Schnitt 12 Tage. Das heißt, dass der Durchlauf der Endfertigung lediglich zwei Tage dauern darf, um die geforderten 14 Tage einhalten zu können. Dies entspricht einem Bestand von rund 270 Stunden.

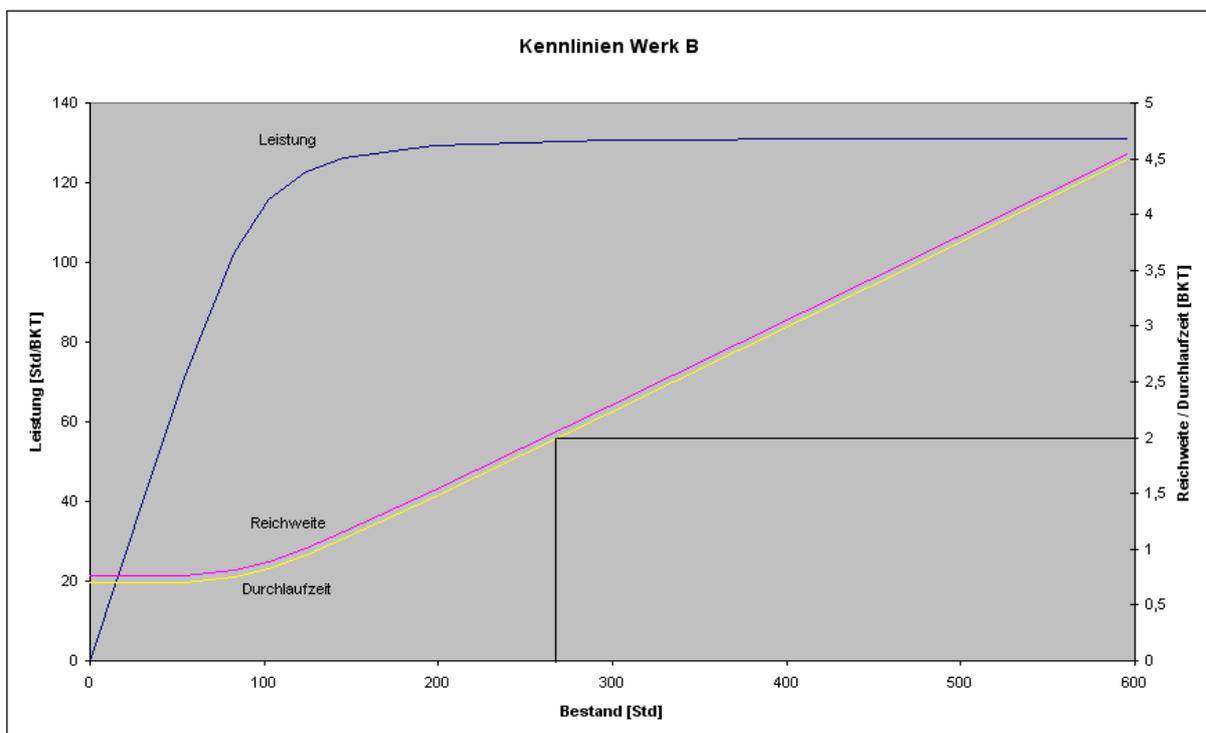


Abbildung 27: Maximalbestand Werk B

Der maximale Auslastungsgrad für Werk B beträgt 82,5%, auch für dieses Werk wird die geplante Betriebszeit mit 22,5 Stunden pro Betriebskalendertag angegeben.

4.7.2 Günstiger Betriebszustand

Als günstiger Betriebszustand wird ein Kompromiss zwischen Leistung bzw. Auslastung und der Durchlaufzeit grafisch ermittelt. Einerseits soll die Leistung möglichst hoch sein, Reichweite und Durchlaufzeit andererseits so niedrig wie möglich.

Abbildung 28 zeigt diesen angestrebten Betriebszustand für Werk A. In diesem Zustand sind nur minimale Auslastungsverluste hinzunehmen, mittlerer Bestand und mittlere Durchlaufzeit werden im Vergleich zum Bestandsgrenzwert aus Kapitel 4.7.1 um nahezu 50% reduziert.

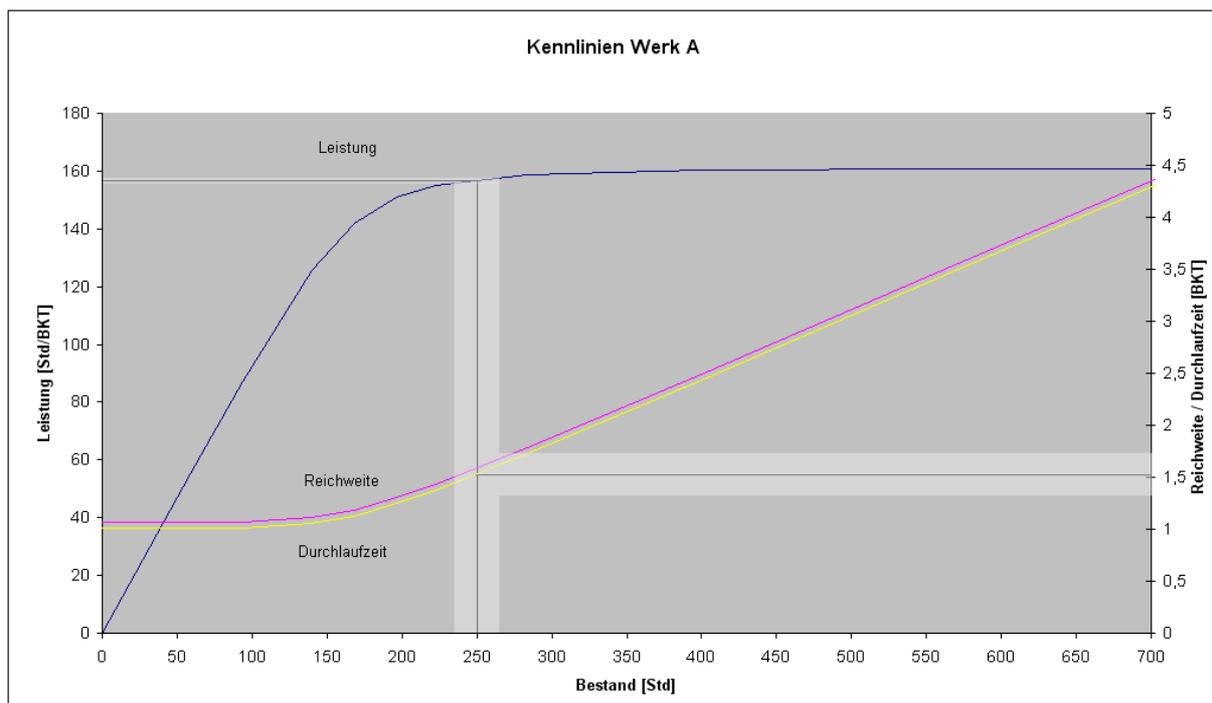


Abbildung 28: Betriebszustand Werk A

Der markierte Bereich um den eingezeichneten Betriebspunkt gibt das Toleranzfeld an und definiert als Ganzes den Betriebszustand.

Der mittlere Bestand dieses Zustands beträgt 250 Stunden. Die maximale Auslastung ändert sich für diesen Zustand geringfügig, die durchschnittliche Leistung ergibt rund

157 Stunden pro Betriebskalendertag. Der mittlere Auslastungsgrad beträgt daher für diesen Zustand 69,8%.

Für Werk B wird ein anzustrebender Betriebszustand auf dieselbe Weise ermittelt. Auch für dieses Werk lässt sich grafisch ein Zustand mit annähernd maximaler Leistung und einer um nahezu 50% verkürzten Durchlaufzeit ermitteln.

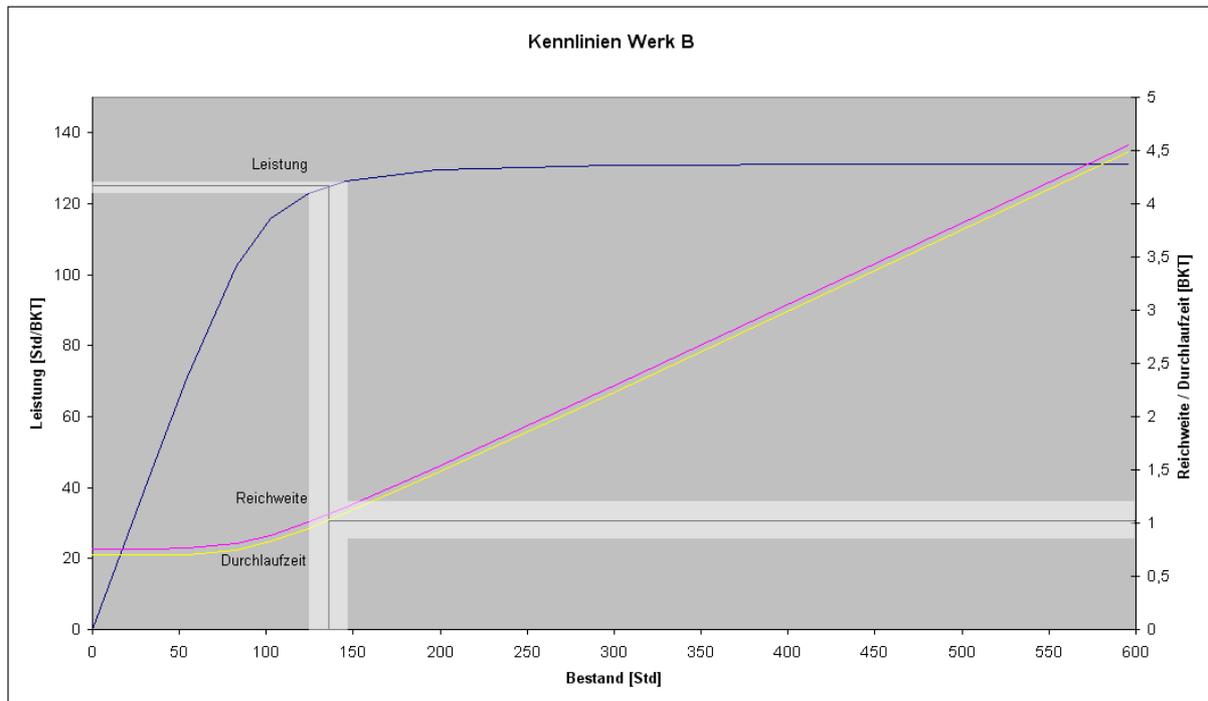


Abbildung 29: Betriebszustand Werk B

Der mittlere Bestand dieses Betriebszustandes beträgt rund 135 Stunden. Der mittlere Auslastungsgrad beträgt für diesen Zustand 79,4%, die mittlere Leistung 125 Stunden pro Betriebskalendertag.

4.7.3 Gegenüberstellung

In diesem Abschnitt werden sowohl die vorgestellten Betriebspunkte als auch der Betriebspunkt bei Einhaltung des idealen Mindestbestands hinsichtlich Bestand, Leistung, Auslastung und Durchlaufzeit verglichen und gegenübergestellt. Bezeichnet wurden diese Betriebszustände nach dem Bestandslevel, da der Bestand die wesentliche Stellgröße zur Erreichung der gewünschten Durchlaufzeit ist, sofern keine Kapazitätsanpassungen vorgenommen werden.

Wenn der Bestand unter den idealen Mindestzustand sinkt, sind große Auslastungsverluste zu erwarten, dieser Wert stellt also das theoretische Minimum dar. Die fol-

genden Vergleichstabellen stellen die möglichen Betriebszustände dar, vom Minimalwert, der sich durch den idealen Mindestbestand ergibt, zum Maximalwert, der zur Erreichung der Lieferzeit nicht überschritten werden darf.

Tabelle 10 zeigt diese Gegenüberstellung für Werk A.

Kennzahl	Idealer Mindestbestand	Günstiger Betriebszustand	Maximaler Bestand zur Erreichung der Lieferzeit
Bestand [Std]	171	250	495
Leistung [Std/BKT]	143	157	161
Auslastung [%]	63,6	69,8	71,5
Durchlaufzeit [BKT]	1,13	1,52	3

Tabelle 10: Gegenüberstellung Bestandsszenarien Werk A

Tabelle 11 zeigt den Vergleich für Werk B.

Kennzahl	Idealer Mindestbestand	Günstiger Betriebszustand	Maximaler Bestand zur Erreichung der Lieferzeit
Bestand [Std]	99	136	270
Leistung [Std/BKT]	114	125	131
Auslastung [%]	72,4	79,4	82,5
Durchlaufzeit [BKT]	0,8	1,01	2

Tabelle 11: Gegenüberstellung Bestandsszenarien Werk B

Die Ermittlung der Auslastung der Werke bezieht sich auf die angegebene maximale Leistung. Wichtig für die Durchlaufzeit ist vor allem der ermittelte Bestand im Arbeitssystem. Wird der ermittelte Grenzwert in einem Werk überschritten, muss auch die Auslastung sinken, bis der Bestand wieder dem Zielwert gleicht. Bei Einhaltung der angegebenen maximalen Auslastung wird im System weder Bestand auf-, noch abgebaut.

Der höhere maximale Auslastungsgrad sowohl in Werk B stammt vor allem aus dem höheren technischen Nutzungsgrad der Maschinen. In Werk B wird der technische Nutzen mit 78% angegeben, in Werk A sind es lediglich 67%.

4.8 Berechnung Fertigwarenbestand

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie die Menge des Fertigwarenbestands berechnet wird, der bereitgehalten werden muss, wenn zu viel Bestand im Arbeitssystem ist, um die geforderte Lieferzeit einzuhalten.

Aus den Arbeitsplänen können die Vorgabestunden, die als Dimension des Bestands angegeben werden, wieder in Stück umgerechnet werden. In Tabelle 12 ist diese Rückrechnung für Werk A dargestellt. Der Produktionsschritt Endfertigung besteht aus den Vorgängen „20“ und „30“, die mittlere Vorgabezeit wird aus dem Durchschnitt sämtlicher Vorgabewerte der erhobenen Daten gebildet, ist also nicht auf die Daten aus Tabelle 12 beschränkt.

Vorgang	Rüsten [min]	Bearbeiten [min]	Mittlere Vorgabezeit pro 100 TSD Stück Endfertigung [Std]	Umrechnungsfaktor Endfertigung	maximale Leistung pro Tag [Std]	mögliche Stück pro Tag
10	40	20,457	1,872157227	53414,32	160,80	8.589.022,21
20	0	70,373				
30	0	65,31				

Tabelle 12: Umrechnung Vorgabestunden in Stück Werk A

Die Umrechnung wird mit folgenden Formeln durchgeführt:

$$\text{Mittlere Vorgabezeit} = \text{Vorgabestunden} / \text{Menge}^{90}$$

$$\text{Umrechnungsfaktor} = \text{Menge} / \text{Vorgabestunden}$$

$$\text{Stückzahl} = \text{Umrechnungsfaktor} * \text{Bestandsstunden}$$

Die Rückrechnung des Grenzbestands zur Erreichung der maximalen Durchlaufzeit ergibt rund 26,5 Millionen Stück Maximalbestand im Arbeitssystem. Die Summe der zu produzierenden Stück aus Aufträgen im Bestand des Systems darf also diese 26,5 Millionen nicht übersteigen.

⁹⁰ In diesem Beispiel 100.000 Stück

Aus der maximalen Leistung, die in Werk A mit 160,8 Stunden pro Betriebskalendertag angegeben wurde, kann die Produktionsmenge an der Endfertigung pro Tag auf rund 8,6 Millionen Stück eingegrenzt werden (siehe Tabelle 12). Mit dieser Zahl kann die Kapazität eines Zeitraums errechnet werden. Übersteigen die eingehenden Aufträge die Kapazität, muss zusätzlich Fertigwarenbestand vorhanden sein, um die Lieferzeit einhalten zu können.

Die Umrechnung des Bestandes aus der Dimension Vorgabestunden in Stück wird nach derselben Vorgangsweise, vorgenommen.

Vorgang	Rüsten [min]	Bearbeiten [min]	Mittlere Vorgabezeit pro 100 TSD Stück Endfertigung [Std]	Umrechnungsfaktor Endfertigung	maximale Leistung pro Tag [Std]	mögliche Stück pro Tag
10	29	20,355	1,729584862	57817,34	130	7.516.254,50
20		39,686				
30		67,25				

Tabelle 13: Umrechnung Vorgabestunden in Stück Werk B

Die Rückrechnung ergibt etwa 15,6 Millionen Stück, die maximal im Bestand des Arbeitssystems sein dürfen. Pro Tag können in Werk B nach der maximalen Leistung ungefähr 7,5 Millionen Stück gefertigt werden. Soll mehr produziert werden, muss demzufolge Fertigware gelagert sein, um die geforderte Lieferzeit einhalten zu können.

Für die Interpretation der maximalen Stückzahl pro Tag ist wichtig, dass sich die Umrechnung auf den Durchschnitt der Vorgabestunden bezieht. Die Verwendung des Durchschnittswerts ist in Summe korrekt, es kann aber durchaus vorkommen, dass die maximale Produktionsmenge in einzelnen Perioden mehr oder auch weniger Stück beträgt, wenn sich die Verteilung der Volumina geringfügig ändert. Die berechnete Anzahl ist also lediglich als Richtwert zu verstehen. Sollte sich der Produktmix häufig in größerem Ausmaß ändern, kann der Durchschnittswert nicht mehr angewandt werden, die Volumina müssen folglich in der Betrachtung berücksichtigt werden.

Da die Produkte von SIG Combibloc wegen des individuellen Druckbildes auf ein bestimmtes Produkt eines bestimmten Kunden ausgerichtet sind, ist nicht nur die Menge des Fertigwarenbestandes wichtig, sondern vor allem auch Ausprägung und Druckdekor.

Wie auch für die Materialbeschaffung müssen hierfür Bedarfsprognosen verwendet werden. Die hohe Qualität dieser sogenannten Forecasts spielt also eine wichtige Rolle für den Aufbau von Fertigwarenbestand.

Die Berechnung der Art und Menge des Fertigwarenbestandes wird an dieser Stelle exemplarisch gezeigt.

Bedarf August 2012	ungefähr mögliche Tagesmenge	mögliche Monatsmenge August	benötigter Fertigwarenbestand
293.426.000	8.600.000	266.600.000	26.826.000

Tabelle 14: Berechnung Fertigwarenbestand Werk A

Die Berechnung aus Tabelle 14 ergibt für Werk A im August 2012 einen benötigten Fertigwarenbestand von rund 26,8 Millionen Stück. Durch das individuelle Druckbild für jedes Produkt muss aber nicht nur darauf geachtet werden, die richtige Menge bereitzuhalten sondern vor allem auch die richtigen Produkte. Vorproduktionen sollten demnach nur für Produkte durchgeführt werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit bestellt werden.

Da die Prognosen bei SIG Combibloc für jedes Produkt eines Kunden berechnet werden, kann so geprüft werden, welche Bestellungen im betreffenden Monat prognostiziert sind. Die Regelmäßigkeit der Aufträge ist von großer Bedeutung für die Auswahl des Fertigwarenbestands. Das Risiko bei falscher Vorproduktion beläuft sich nicht nur auf Anhäufung von Lagerbestand und damit gebundenem Kapital sondern könnte bei zwischenzeitlichem Druckdekorwechsel des Kunden auch zur Vernichtung der Vorproduktion führen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Analyse von Arbeitssystemen hinsichtlich der produktionslogistischen Zielgrößen können unterschiedliche Methoden verwendet werden. Kennlinientheorie, Simulation und Warteschlangentheorie wurden in dieser Arbeit näher behandelt, jede dieser Methoden weist sowohl Vor- als auch Nachteile auf.

Für die Wahl einer dieser Methoden ist die Nutzwertanalyse gut geeignet. Bei Anwendung dieses Verfahrens ist es zwar durchaus möglich, dass subjektive Präferenzen in die Bewertung einfließen, das Verfahren erweist sich jedoch als übersichtlich und die Anwendung einer von Entscheidungsträgern gewünschten Methode kann sich positiv auf deren Zustimmung zu den Ergebnissen auswirken.

Mit Hilfe der Kennlinientheorie wurde schließlich die Problemstellung von SIG Combibloc behandelt. Für zwei der geplanten drei Werke konnten Ergebnisse ermittelt werden, für das Übrige weisen die erhobenen Daten einen Fehler auf. Da nicht geklärt werden konnte, um welchen Fehler es sich dabei handelt, musste auf die Lösungsfindung für dieses Werk im Zuge dieser Arbeit verzichtet werden.

Für die angestrebte Lieferzeit von drei Wochen darf die Produktionsdurchlaufzeit bei SIG Combibloc höchstens zwei Wochen betragen. Entscheidend dafür ist der Bestand an den Arbeitssystemen, der aus der Länge der Warteschlangen vor den Maschinen und den zu einem gewissen Zeitpunkt gerade bearbeiteten Aufträgen besteht. Da für Unternehmen generell und auch für SIG Combibloc die produktionslogistische Zielgröße Kapazitätsauslastung einen hohen Stellenwert aufweist, wurde aus den Leistungsdaten der Auslastungsgrad bestimmt. Bei Einhaltung des ermittelten maximalen Auslastungsgrades kommt es im Bezug auf den Bestand am entsprechenden Arbeitssystem zu keiner Erhöhung, aber auch zu keinem Abbau.

Bezüglich des ermittelten maximalen Auslastungsgrades hat die Analyse ergeben, dass dieser für Werk B um mehr als 10% höher sein darf als für Werk A. Als Grund hierfür ist vor allem der technische Nutzungsgrad der verwendeten Maschinen zu nennen. Eine Reduzierung des Leistungsgrades der Anlagen führt direkt zu Kapazitätsverlusten, wodurch sich die maximale Auslastung, bei der kein Bestand angehäuft wird, verringert.

Wenn durch prognostizierte Bedarfssituationen zu viel Bestand im System vorhanden wäre, um den Bedarf innerhalb der zugesagten Zeit ausliefern zu können, kann entweder nach dem beschriebenen Vorgehen Fertigwarenbestand aufgebaut werden, es können aber auch andere Maßnahmen in Betracht gezogen werden.

Zum Beispiel kann der technische Nutzungsgrad und somit die zur Fertigung verfügbare Kapazität durch verschiedene Maßnahmen erhöht werden. Durch Anlagenerneuerungen kann nicht nur der Leistungsgrad, sondern auch die Produktionsgeschwindigkeit erhöht werden, was ebenfalls zu einer Kapazitätserhöhung führt.

Weiters kann durch quantitative Kapazitätserweiterungen die maximale Leistung der Arbeitssysteme erhöht werden. Dies kann durch Einstellung von Personal und Inbetriebnahme zusätzlicher Anlagen erfolgen, dabei müssen die entstehenden Fixkosten betrachtet werden.

Die berechneten Grenzwerte dieser Arbeit können verwendet werden, um die verfügbare Kapazität Bedarfsprognosen gegenüberzustellen. Bei Eintreten eines Engpasses muss erwogen werden, welche der beschriebenen Maßnahmen am besten geeignet ist, um alle Vorgaben zu erfüllen. Dazu muss einerseits ein Kostenvergleich und andererseits auch eine Risikoanalyse durchgeführt werden. Risikobehaftet sind vor allem der Aufbau von Fertigwarenbestand und die quantitative Erweiterung der Kapazität. Die Bereithaltung der „falschen“ Fertigware führt zu keiner Lösung des Engpasses und im schlimmsten Fall bei Druckdekorwechseln zur Vernichtung des Bestandes. Zusätzliche Personal- oder Maschinenkapazität führt zu Leerkosten, wenn die Erhöhung des Bedarfes nur von kurzer Dauer ist.

Literaturverzeichnis

Adam, D. (1996): Planung und Entscheidung: Modelle – Ziele – Methoden. Wiesbaden: Gabler Verlag. 4. Auflage, ISBN 3-409-44613-3

Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier H.; Furmans, K. (2008): Handbuch Logistik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. 3. Auflage, ISBN 978-3-540-72928-0

Arnold, D.; Furmans, K. (2007): Materialfluss in Logistiksystemen. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. 5. Auflage. ISBN 978-3-540-45659-9

Brecht, U. (2005): BWL für Führungskräfte: Was Entscheider im Unternehmen wissen müssen. Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN 3-409-12742-9

Bungartz, H.-J.; Zimmer, S.; Buchholz, M.; Pflüger, D. (2009): Modellbildung und Simulation: Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. ISBN 978-3-540-79809-5

Disselkamp, M.; Schüller, R. (2004): Lieferantenrating: Instrumente, Kriterien, Checklisten. Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN 978-3-409-12429-4

Domschke, W.; Drexl, A. (2004): Einführung in Operations Research. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag. 6. Auflage, ISBN 3-540-23431-4

Götze, U. (2008): Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. 6. Auflage, ISBN 978-3-540-78872-0

Höher, P. A. (2001): Grundlagen der digitalen Informationsübertragung: Von der Theorie bis zur Konzeption. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN 978-3-8348-0880-6

Jodlbauer, H. (2008): Produktionsoptimierung: Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung. Wien: Springer Verlag. 2. Auflage, ISBN 978-3-211-78140-1

Klaus, P.; Krieger, W. (2008): Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse. Wiesbaden: Gabler Verlag. 4. Auflage, ISBN 978-3-8349-0149-1

Klaus, P.; Staberhofer, F.; Rothböck, M. (Hrsg.) (2007): Steuerung von Supply Chains: Strategien – Methoden – Beispiele. Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN 978-3-8349-0510-9

Kolonko, M. (2008): Stochastische Simulation: Grundlagen, Algorithmen und Anwendungen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. ISBN 978-3-8351-0217-0

Küll, R.; Stähly, P. (1999): Zur Planung und effizienten Abwicklung von Simulationsexperimenten. In: Biethahn, J.; Hummeltenberg, W.; Schmidt, B.; Stähly, P.; Witte, T.: Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe: State of the Art und neuere Entwicklungen. Heidelberg: Physica Verlag. ISBN 3-7908-1178-5

Kumpf, A. (2001): Anforderungsgerechte Modellierung von Materialflusssystemen zur planungsbegleitenden Simulation. München: Herbert Utz Verlag. ISBN 3-8316-0029-5

Lödding, H. (2008): Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. 2. Auflage, ISBN 978-3-540-76860-9

Nyhuis, P. (2008): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. ISBN 978-3-540-75641-5

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2003): Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag. 2. Auflage, ISBN 978-3-540-43700-2

Pawellek, G. (2007): Produktionslogistik: Planung – Steuerung – Controlling. München: Hanser Verlag. ISBN 978-3-446-41057-2

SIG Combibloc (2012): Online im Internet:

<http://www.sig.biz/site/de/sig_combibloc_group/unternehmensprofil/Unternehmensprofil.jsp> Abfrage: 2.1.2012, MEZ 14:50 Uhr

Schmidt, M.; Wriggers, F. S. (2008): Logistische Modellierung von Lagerprozessen. In: Nyhuis, P.: Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. ISBN 978-3-540-75641-5

Schmidt, R.; Schitter, W. (2007): World Class Manufacturing: Das Logistikkonzept von Schitter & Partner. In: Klaus, P.; Staberhofer, F.; Rothböck, M. (Hrsg.): Steuerung von Supply Chains: Strategien – Methoden – Beispiele. Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN 978-3-8349-0510-9

Thonemann, U. (2010): Operations Management: Konzepte, Methoden und Anwendungen. München: Verlag Pearson Studium. 2. Auflage, ISBN 978-3-8273-7316-8

Wehrle, K.; Günes, M.; Gross, J. (2010): Modeling and Tools for Network Simulation. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. ISBN 978-3-642-12330-6

Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O. (2008): Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. ISBN 978-3-540-35276-1

Wiendahl, H.-P. (2008): Betriebsorganisation für Ingenieure. München Wien: Carl Hanser Verlag. 6. Auflage, ISBN 978-3-446-41279-8

Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P.; Fischer, A.; Grabe, D. (2006): Controlling in Lieferketten. In: Schuh, G.: Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag. 3. Auflage, ISBN 978-3-540-40306-7

Yu, K.-W. (2009): Schedule Reliability Operating Curves. In: Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Fundamentals of Production Logistics: Theory, Tools and Applications. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. ISBN 978-3-540-34210-6

Zimmermann, H.-J. (2008): Operations Research: Methoden und Modelle. Für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte und Informatiker. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag. 2. Auflage, ISBN 978-3-8348-0455-6