

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

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



# Diplomarbeit

Entwurf eines Analysewerkzeugs  
zur Identifizierung logistischer Engpasssysteme in der  
variantenreichen Werkstattsteuerung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplomingenieurs (Dipl.-Ing.) unter der Leitung von

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

und

**Dipl.-Ing. Stefan Auer**

Institut für Managementwissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

**Alexander Plakolm**

**0530371**

Wien, am 9. August 2011

---

Alexander Plakolm

## **Abstract**

This thesis is concerned with production management mainly the part of production control. Due to the variety and complexity of production processes it is often very difficult to locate logistical bottleneck systems. For this reason a simple method was created to identify bottleneck systems on the basis of plan quantities. As a starting point the basics of production management and control are briefly described. The fundamentals of production logistics describe the mathematical relationships of the production processes. Based on the characteristic production curves a planning tool for the simulation of various products is developed. This instrument allows very easily to detect bottleneck systems, and serves the purpose to develop an illustration of the capacity load, visualization of the stock characteristics and machine load given according to the products. Capacity characteristics are applied to identify the flexibility of production. A set of measures helps to reduce the stocks at the bottleneck systems. In cooperation with Fraunhofer Research GmbH (range of productions and logistics management) an actual case study is analyzed in order to ensure the practicality and to visualize the proceeding.

## **Kurzfassung**

Durch die Variantenvielfalt und Komplexität der heutigen Produktionsprozesse ist es oftmals sehr schwierig logistische Engpasssysteme zu lokalisieren. Aus diesem Grund soll eine einfache Methode zur Identifikation von Engpasssystemen auf der Grundlage von Planstückzahlen geschaffen werden. In vorliegender Arbeit werden die Grundlagen der werkstattgesteuerten Produktionsplanung und -steuerung kurz beschrieben und erläutert. Die produktionstechnischen Prozesse werden durch die mathematischen Zusammenhänge erklärt und anhand von Produktionskennlinien praktisch angewendet. Aufbauend auf der Kennlinientheorie wird ein Planungswerkzeug zur Simulation von verschiedenen Produktmixvarianten erstellt. Das Planungsinstrument beinhaltet unter anderem eine einfache Identifizierung von Engpasssystemen, Veranschaulichung von Kapazitätsbelastungen, Bestandsdarstellung und eine Arbeitssystembelastung abhängig vom Produkt. Mit Hilfe sogenannter Kapazitätshüllkurven wird das Kapazitätsflexibilitätspotential der eigenen Produktion messbar gemacht und ein Maßnahmenkatalog zur Behebung von Engpasssystemen wird in dieser Arbeit zur Seite gelegt. Um die Praxistauglichkeit zu gewährleisten und die Vorgehensweise zu visualisieren, wurde in Zusammenarbeit mit der Fraunhofer Research GmbH (Bereich Produktions- und Logistikmanagement) ein aktuelles Fallbeispiel analysiert.

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende

Diplomarbeit

ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüferin/ keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht.

Wien, am 9. August 2011

Alexander Plakolm

## Danksagung

Mit dem Abschluss meines Studiums geht für mich ein ungemein schöner und zugleich prägender Abschnitt meines Lebens zu Ende. Großer Dank gebührt daher meinen Eltern Alex und Andrea Plakolm, welche mir das Studium ermöglicht und mich in jeglicher Hinsicht stetig unterstützt haben.

Ich verfasste meine Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit der Fraunhofer Research GmbH und möchte mich daher sehr herzlich bei Dipl.-Ing. Stefan Auer bedanken, der mich beim Verfassen meiner Diplomarbeit erstklassig betreut hat. Ich konnte bei etwaigen Fragen immer an ihn herantreten und er nahm sich stets die Zeit um mir weiterzuhelfen.

Seitens der universitären Betreuung möchte ich mich bei Ao.Univ.Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Kurt Matyas sehr bedanken.

Ein weiterer herzlicher Dank geht an meine Großeltern Wilfried und Gertrud Freuis, die mir meinen Studentensold immer etwas versüßten.

Zuletzt möchte ich mich noch bei all meinen Freunden bedanken, die mich über die Studienzeit hinweg begleitet haben und mit denen ich eine sensationelle Zeit erleben durfte.

Rückblickend kann ich nur ein Wort von F. Torberg in den Mund nehmen:

*„Es war schon eine tolle, tolle Zeit!!!“*

---

# Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	I
Kurzfassung .....	II
Eidesstattliche Erklärung .....	III
Danksagung .....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel der Arbeit.....	2
1.2 Logistische Erfolgsfaktoren.....	3
1.3 Zielkonflikte der Ablaufplanung.....	4
<b>2 Grundlagen Produktionsplanung und -steuerung .....</b>	<b>7</b>
2.1 Was ist Produktionsplanung/ -steuerung (PPS)? .....	7
2.1.1 Kernaufgaben.....	9
2.1.2 Querschnittsaufgaben.....	11
2.1.3 Datenverwaltung .....	12
2.2 Steuerungsrelevante Fertigungsmerkmale.....	13
2.2.1 Fertigungsprinzipien .....	13
2.2.2 Fertigungsarten .....	15
2.2.3 Art des Teileflusses.....	16
2.2.4 Die Variantenanzahl.....	19
2.2.5 Materialflusskomplexität.....	19
2.2.6 Schwankungen des Kunden- und Kapazitätsbedarfes.....	20
2.2.7 Matrix für steuerungsrelevante Fertigungsmerkmale .....	21
<b>3 Modell der Fertigungssteuerung .....</b>	<b>22</b>

---

<b>4</b>	<b>Logistische Zielgrößen</b> .....	<b>26</b>
4.1	Externe logistische Zielgrößen .....	26
4.2	Interne logistische Zielgrößen .....	29
4.2.1	Trichtermodell .....	29
4.2.2	Durchlaufdiagramm .....	34
4.2.3	Produktionskennlinien.....	39
<b>5</b>	<b>Logistische Potentialanalyse</b> .....	<b>48</b>
5.1	Zielsetzung der Analyse .....	49
5.2	Datenerfassung .....	49
5.3	Lokalisierung der Engpasssysteme .....	51
5.3.1	Bestandsberechnung .....	51
5.3.2	Berechnung des Variationskoeffizient der Auslastung (VAKO <sub>A</sub> ) .....	52
5.3.3	Reichweitenberechnung .....	54
5.4	Generelle Vorgehensweise zur Auswahl von Maßnahmen .....	58
5.4.1	Arbeitssystemanalysen .....	60
5.5	Engpasssysteme mittels Planproduktstückzahlen.....	64
5.5.1	Auswertewerkzeug für die zukünftige Sollproduktion.....	65
<b>6</b>	<b>Rationalisierungspotential mittels flexibler Kapazitäten</b> .....	<b>70</b>
6.1	Kapazitätshüllkurven .....	70
6.2	Kapazitätsflexibilität der Betriebsmittel .....	73
6.3	Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter.....	74
6.4	Maßnahmen zur Kapazitätsänderung.....	76
6.5	Potential des Analysewerkzeugs anhand eines Beispiels.....	78
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung/ Ausblick</b> .....	<b>89</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>91</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>95</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kriterien für den Kauf von Produkten (Siemens AG).....	3
Abbildung 2: Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung.....	4
Abbildung 3: Logistische Zielgrößen unterschiedlicher Bevorratungsstrategien ...	5
Abbildung 4: Klassisches PPS-Modell nach Rolf Hackstein .....	7
Abbildung 5: Aufgabensicht des Aachner PPS-Modells .....	8
Abbildung 6: Ordnungskriterien für die Fertigungsprinzipien.....	13
Abbildung 7: Merkmalsausprägungen der Fertigungsarten .....	15
Abbildung 8: Losweiser Materialtransport .....	17
Abbildung 9: One-piece-flow -Prinzip.....	17
Abbildung 10: Überlappte Fertigung von Aufträgen.....	18
Abbildung 11: Materialfluskomplexität .....	19
Abbildung 12: MRP II Konzept .....	22
Abbildung 13: Modell der Fertigungssteuerung .....	23
Abbildung 14: Trichtermodell .....	29
Abbildung 15: Zeitanteil der Durchlaufzeit .....	32
Abbildung 16: Durchlaufdiagramm.....	34
Abbildung 17: Darstellung Terminabweichung .....	37
Abbildung 18: Graphische Darstellung von Produktionskennlinien .....	39
Abbildung 19: Betriebszustände aus dem Durchlaufdiagramm .....	40
Abbildung 20: Durchlaufdiagramm beim idealen Fertigungsprozess .....	42
Abbildung 21: ideale Produktionskennlinien.....	44
Abbildung 22: Idealer versus angenäherter Leistungskennlinie.....	45
Abbildung 23: Erschließung logistischer Rationalisierungspotentiale.....	58
Abbildung 24: Durchlaufdiagramm AS 1967 .....	61
Abbildung 25: Produktionskennlinien für AS 1967 .....	62
Abbildung 26: Engpässe.....	64
Abbildung 27: Kapazitätshüllkurven.....	71
Abbildung 28: Kapazitätshüllkurve der Mindestinstallationszeit .....	72
Abbildung 29: Kapazitätsflexibilität vs. Mindestinstallationszeit .....	72
Abbildung 30: Produktgruppenverteilung.....	78
Abbildung 31: Tagesbelastung AS 8054 .....	80
Abbildung 32: Bestandsverlauf AS 8054 .....	83



---

Abbildung 33: Reichweite AS 8049 .....	84
Abbildung 34: Produktanteile am AS 8049.....	85
Abbildung 35: Produktanteile am AS 8054 (ohne 2198815, 2000119).....	85
Abbildung 36: Belastungsverlauf mit erhöhter Kapazität bei AS 8049 .....	86
Abbildung 37: Reichweite AS 7705 .....	87
Abbildung 38: modifizierte Reichweite AS 7705.....	88

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Steuerungsrelevante Fertigungsmerkmale .....	21
Tabelle 2: Einordnung gemäß steuerungsrelevanter Kriterien .....	50
Tabelle 3: Bestandsdarstellung .....	51
Tabelle 4: Berechnungsgrundlage für $VAKO_A$ .....	53
Tabelle 5: Berechnung Reichweite .....	56
Tabelle 6: Kennzahlen AS 1967.....	61
Tabelle 7: Produktstammdaten (beispielhaft) .....	65
Tabelle 8: Plankapazitäten (beispielhaft).....	67
Tabelle 9: Systembelastung (beispielhaft).....	67
Tabelle 10: Bestandsberechnung (beispielhaft).....	68
Tabelle 11: Reichweitenberechnung (beispielhaft) .....	69
Tabelle 12: Maßnahmen zur Kapazitätsänderung .....	76
Tabelle 13: Planstückzahlen gemäß Produktportfolio.....	79
Tabelle 14: Plankapazität .....	79
Tabelle 15: Bestandsverlauf .....	83
Tabelle 16: Tagesbelastung (tägl. Auftragszugang).....	96
Tabelle 17: Belastungsabgleich mit verfügbarer Kapazität.....	99
Tabelle 18: Berechnung Reichweite Engpasssysteme .....	101

# 1 Einleitung

Durch die Globalisierung und internationale Vernetzung, agieren Unternehmen auf globalen Märkten und sind einem viel größeren Wettbewerb wie früher ausgesetzt. Die Schnelllebigkeit unserer Zeit erfordert in zunehmendem Maße die Flexibilität jedes einzelnen Unternehmens, hinsichtlich Produktgestaltung und -bereitstellung, um am weltweiten Markt bestehen zu können.

Wissenschaftler und Unternehmensführer sind sich einig, dass jene Unternehmen am erfolgreichsten sind, welche Produkte mit hohem Kundennutzen produzieren und sich am schnellsten den globalen Marktanforderungen anpassen können.

Produktionsunternehmen müssen sich daher ständig verbessern um sich Wettbewerbsvorteile verschaffen zu können. Es müssen Leistungsverbesserungen entlang der gesamten Wertschöpfung stattfinden, da punktuelle Verbesserungen oft zu wenig sind, um eine nachhaltige Stärkung der Unternehmensposition zu erreichen.<sup>1</sup>

Aus diesen Gründen kann es sich ein Unternehmen nicht leisten, die Verluste der eigenen Wertschöpfungskette nicht zu erkennen und zu beheben. Erfolgreiche Unternehmen haben weniger Bestände und binden daher weniger Kapital. Sie liefern pünktlich und schnell und können somit auf eine kostenintensive Lagerhaltung verzichten.

Durch die zu zunehmende Produktkomplexität und Unsicherheit der Märkte ist es zunehmend schwieriger geworden die Marktnachfrage zu prognostizieren und eine genaue Fertigungsplanung zu erstellen.<sup>2</sup> Im Sinne einer hohen logistischen Zielerreichung gewinnt die Fertigungssteuerung somit immer mehr an Bedeutung. Das Streben nach hoher Lieferfähigkeit, -treue bei geringstmöglichen Logistik- und Produktionskosten zu erreichen ist somit gefordert. Vor allem in der industrialisierten Welt, wo ein sehr hohes Lohnniveau vorherrscht, ist es für Produktionsunternehmen von ungemeiner Bedeutung, hinsichtlich Fertigungsplanung und -steuerung, eine Vorreiterrolle einzunehmen um am globalen Markt bestehen zu können.

---

<sup>1</sup> (Wildemann, 1998)

<sup>2</sup> (Lödding, 2005, S. 1)

## 1.1 Ziel der Arbeit

Wie schon erwähnt, gewinnt die Fertigungssteuerung und -planung immer mehr an Bedeutung und ist unverzichtbarer Bestandteil einer wettbewerbsorientierten Unternehmensführung. Vielen Unternehmen fehlen oftmals die genauen Kenntnisse über die Zusammenhänge von den Prozessen in Produktionssystemen. Es gibt eine Unmenge an Büchern und Theorien zum Thema der Fertigungssteuerung und -planung, jedoch häufig sehr theoretisch und kompliziert.

Es wird somit versucht, eine einfache Vorgehensweise zur Identifikation von Engpasssystemen in der eigenen Produktion zu konzipieren. Diese Arbeit soll den Beitrag leisten, Fertigungsabläufe exakt analysieren zu können um anschließend deren logistisches Potential zu erkennen. Es soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass sich diese Arbeit vorwiegend mit der werkstattgesteuerten Produktfertigung beschäftigt.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Grundbegriffe und Modelle der Werkstättenfertigung kurz beschrieben und erläutert.

Um die eigenen Produktionsprozesse analysieren und verstehen zu können, werden im zweiten Schritt die sogenannten Produktionskennlinien herangezogen. Es wird versucht jene Theorie verständlich und anwendungsbezogen zu erklären. Ziel ist es eine allgemeine Vorgehensweise in der Analyse von Fertigungsprozessen zu schaffen um sie anschließend vielseitig einsetzbar zu machen.

Im dritten Schritt soll aufbauend auf diesen Kenntnissen eine Vorgehensweise zur Identifikation von Engpasssystemen auf der Basis von Planproduktstückzahlen erarbeitet werden.

Als Hilfestellung für die Ausregelung von Engpasssystemen soll ein Maßnahmenkatalog zur Ausnutzung der eigenen Kapazitätsflexibilität zur Seite gestellt werden, um eine vereinfachte und vor allem anwendungsbezogene Entscheidungsfindung zu erreichen.

Anhand eines Praxisbeispiels in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Austria Research GmbH wird die Praxistauglichkeit der Methode gewährleistet werden.

## 1.2 Logistische Erfolgsfaktoren

Um sich am Markt gegenüber den Mitbewerbern zu differenzieren, gewinnen neben innovativen Produkten, Qualität und Preis die logistischen Leistungsmerkmale immer mehr an Relevanz. Mit der Produktion, dem Ort der primären Leistungserstellung werden in diesem Zusammenhang mit den logistischen Zielgrößen Beiträge zur Steigerung der Effektivität abverlangt.<sup>3</sup>

Die gesamte Wertschöpfungskette vom Lieferanten über die Produktion bis hin zum Kunden muss so gestaltet werden, dass es möglich ist, in kürzester Zeit auf Marktänderung zu reagieren. Da die Produktionslogistik maßgeblichen Anteil an der Erfüllung einer optimierten Lieferkette hat, ist die Produktionslogistik Untersuchungsobjekt in Forschung und Praxis. Die unten stehende Untersuchung der Firma Siemens AG zeigt die Bedeutung der Kaufkriterien.<sup>4</sup>

Kaufkriterium	Relative Bedeutung des Kaufkriteriums				
	weniger wichtig 1	2	3	4	sehr 5 wichtig
Produktqualität					
Preis					
Liefertreue					
Lieferzeit					
Flexibilität					
Informationsbereitschaft					
Produktpalette					

**Abbildung 1: Kriterien für den Kauf von Produkten (Siemens AG)**

Wie oben ersichtlich ist, nehmen die logistischen Kenngrößen wie Liefertreue (Einhaltung zugesagter Liefertermine), Lieferzeit und Flexibilität einen immer größeren Stellenwert beim Kunden ein. Ein weiteres wichtiges Leistungsmerkmal ist die Lieferfähigkeit (Fähigkeit zum geforderten Liefertermin zu liefern). Ziel der Produktionslogistik sollte somit das Erreichen einer hohen Liefertreue und kurzen Lieferzeiten zu möglichst geringen Produktions- und Logistikkosten sein.

<sup>3</sup> (Zahn & Dillerup, 1994)

<sup>4</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 2)

## 1.3 Zielkonflikte der Ablaufplanung

Zweckmäßigerweise wird das Zielsystem der PPS in eine Außen- und Innensicht gegliedert.<sup>5</sup>

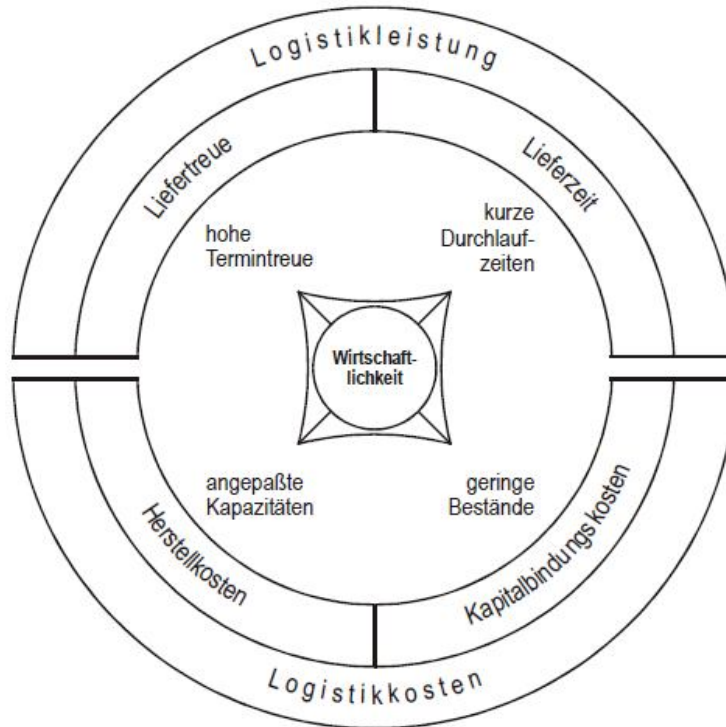


Abbildung 2: Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung<sup>6</sup>

Wie in obenstehender Abbildung ersichtlich ist, umfasst die Außensicht die Bereiche der Logistikleistung und der Logistikkosten. Die Logistikleistung wird über die Faktoren der Liefertreue und Lieferzeit bewertet. Die Logistikkosten werden in Kapitalbindungskosten und Herstellungskosten untergliedert.

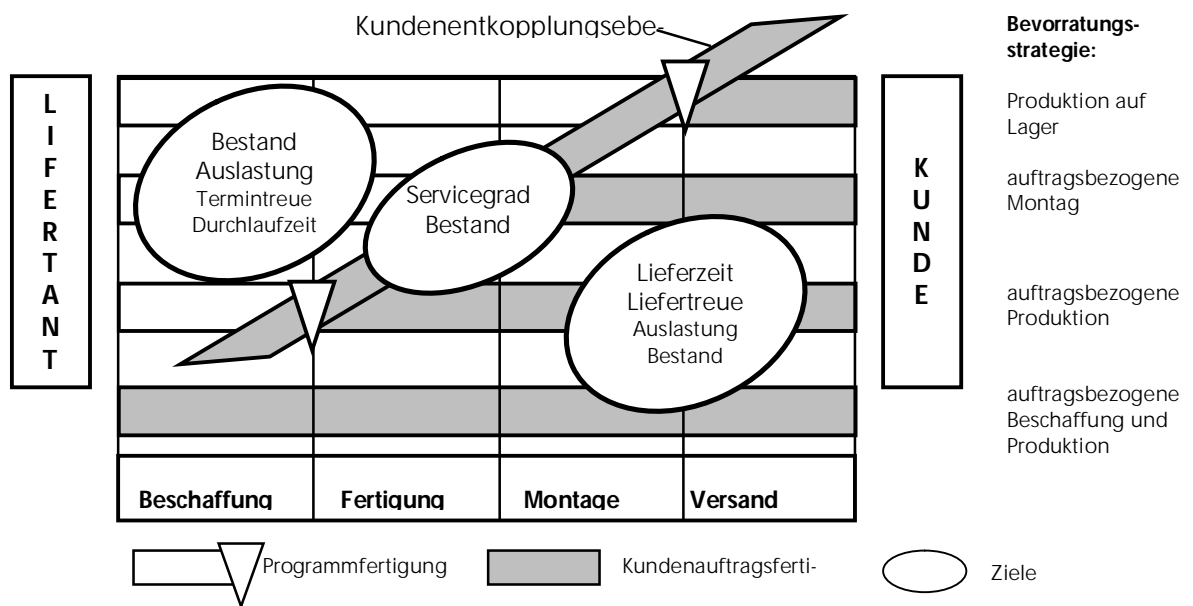
In der Innensicht lässt sich das Zielsystem in Markt- und Betriebsziele untergliedern. Zu den Marktzielen gehören hohe Termintreue und kurze Durchlaufzeiten. Zu den Betriebszielen zählen angepasst Kapazitäten und geringe Bestände. Da Unternehmen nur begrenzte Ressourcen zur Verfügung stehen und nicht beliebig schnell verfügbar sind, entsteht ein ständiger Wettbewerb der Aufträge um die Kapazitäten.<sup>7</sup> Daraus resultiert ein Zielkonflikt, und die Gegenläufigkeit dieser

<sup>5</sup> (Wiendahl.H.-P., 1997, S. 251 ff)

<sup>6</sup> (Wiendahl.H.-P., 1997, S. 251 )

<sup>7</sup> (Wiendahl.H.-H., 2002, S. 33)

Zielsetzungen beschrieb Gutenberg bereits als „Dilemma der Ablaufplanung“.<sup>8</sup> Um eine hohe Auslastung zu gewährleisten müssen hohe Bestände bereitgestellt werden, dies jedoch erhöht wiederum die Durchlaufzeit. Es gilt somit nicht nur ein Ziel zu maximieren, sondern es müssen immer auch die Auswirkungen auf die anderen Ziele berücksichtigt werden.<sup>9</sup> Als Grundlage für die Zielgewichtung wird die Bevorratungsstrategie verwendet. Der Kundenentkopplungspunkt legt fest, ob es sich eher um eine Auftrags- oder Lagerproduktion handelt.



**Abbildung 3: Logistische Zielgrößen unterschiedlicher Bevorratungsstrategien<sup>10</sup>**

Wie in Abbildung 3 ersichtlich ist, werden von Lagerfertigern die Betriebsziele wie hohe Auslastung bei geringem Bestand verfolgt. Für Auftragsfertiger hingegen spielen die Marktziele wie Durchlaufzeit und Lieferzeit eine größere Rolle. Bei der Zieldiskussion zwischen Lager- und Auftragsfertigern, nimmt die Bedeutung der Liefertreue und Lieferfähigkeit insbesondere bei den Lagerfertigern als eine wichtige Zielgröße stetig zu.<sup>11</sup> Für die komplexe Problemstellung der Zielfestlegung mit ständig wechselnden Bedingungen existiert keine geschlossene Lösung, sondern es ist vielmehr ein Abstimmen aufbauender Aufgaben.<sup>12</sup> Um die Herausforderung der gegenläufigen Betriebsziele zu managen, wurden Modelle der der

<sup>8</sup> (Gutenberg, 1951, S. 159)

<sup>9</sup> (Nyhuis & H.-P. Wiendahl, 1999, S. 4)

<sup>10</sup> (Eidenmüller, 1995, S. 203)

<sup>11</sup> (Wiendahl.H.-H., 2002, S. 33)

<sup>12</sup> (Wiendahl.H.-P., 1999, S. 14-5)

Produktionsplanung und -steuerung entwickelt. Der VDI definiert die Teilgebiete wie folgt:<sup>13</sup>

Produktionsplanung ist das systematische Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegen des Ablaufs zum Erreichen dieser Ziele.

Produktionssteuerung ist das Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität, Kosten und Arbeitsbedingungen.

---

<sup>13</sup> (VDI, 1992, S. 167)



## 2 Grundlagen Produktionsplanung und -steuerung

Dieses Kapitel widmet sich den theoretischen Begrifflichkeiten und Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. Funktionen und Aufgaben der PPS werden kurz beschrieben und erläutert. Ebenso werden die Begriffe der steuerungsrelevanten Fertigungsmerkmale zur Kategorisierung von Unternehmen kurz erörtert. Dieser Abschnitt soll somit zu einem gemeinsamen Grundverständnis der PPS führen.

### 2.1 Was ist Produktionsplanung/ -steuerung (PPS)?

Erstmalig hatte Rolf Hackstein eine breit akzeptierte Definition der Produktionsplanung/ -steuerung (PPS) definiert. In unten stehender Abbildung ist ersichtlich, dass nach Hackstein als zentrale Funktionen der Produktionsplanung die Produktionsprogrammplanung, Mengenplanung, Termin- und Kapazitätsplanung anzusehen sind. Im Bereich der Produktionssteuerung sind die Auftragsfreigabe und Auftragsüberwachung die Hauptfunktionen. Weiterer wichtiger Bestandteil des Modells ist die Datenverwaltung, welche auch für die Kommunikation zwischen der Produktionsplanung und Produktionssteuerung zuständig ist.

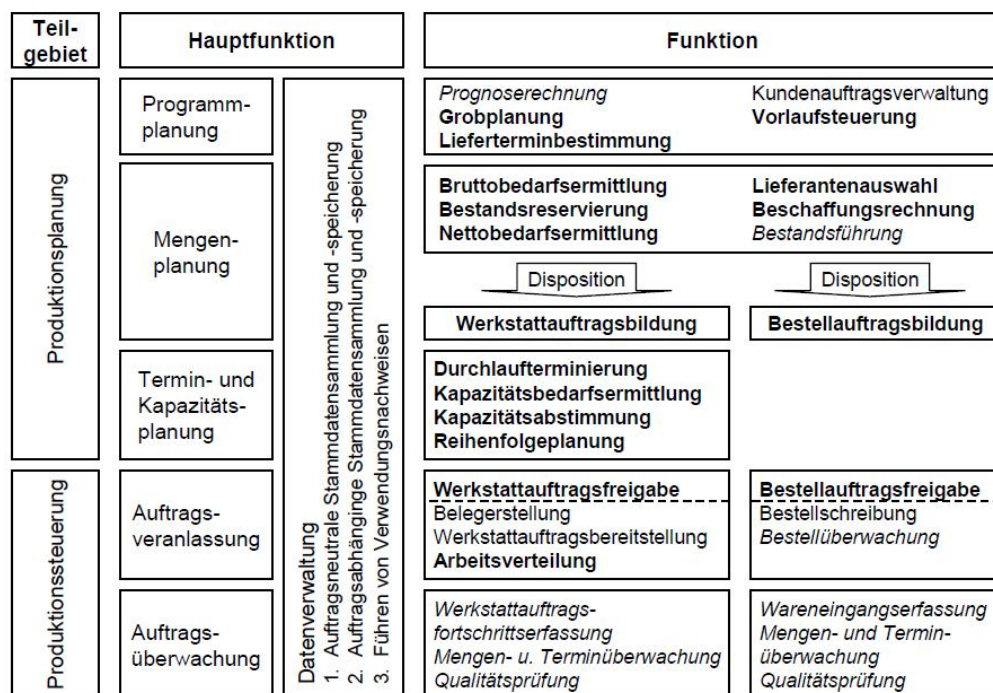
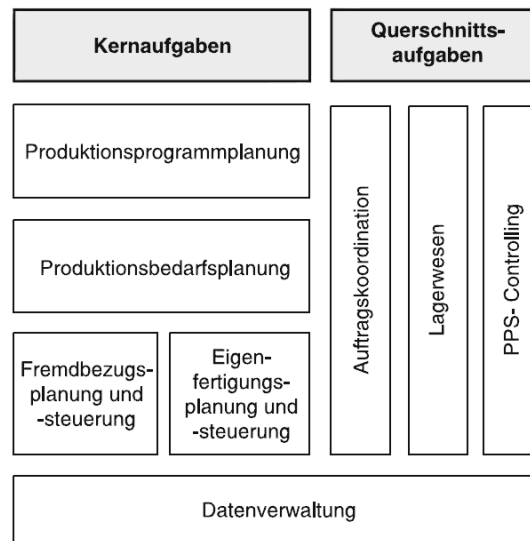


Abbildung 4: Klassisches PPS-Modell nach Rolf Hackstein<sup>14</sup>

<sup>14</sup> (Hackstein, 1989, S. 5 ff)

Aufbauend auf dem Modell nach Hackstein wurde das Aachener PPS- Modell entwickelt, welches in der deutschsprachigen Literatur sehr weit verbreitet ist. Wie in Abbildung 5 ersichtlich ist, gliedert es sich in die 3 Hauptbereiche: Kernaufgaben, Querschnittsaufgaben und Datenverwaltung.



**Abbildung 5: Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells<sup>15</sup>**

Das Aachener PPS-Modell stellt ein sogenanntes Referenzmodell der integrierten Produktionsplanung und -steuerung dar.<sup>16</sup> Seine Aufgabe besteht darin, das Leistungsspektrum eines Unternehmens darzustellen, es zu planen, steuern, überwachen und gegebenenfalls korrigierend einzugreifen. Es werden die Wertschöpfungsprozesse (Planen, Beschaffen, Produzieren, Liefern) eines Unternehmens betrachtet. Da es die Anforderungen der Kunden und Lieferanten im Sinne einer Supply Chain Managements berücksichtigt, stellt es einen unternehmensübergreifenden Überblick dar.<sup>17</sup> Zu den Kernaufgaben eines PPS-Systems zählen die Aufgaben der Produktionsbedarfsplanung, Fremd- oder Eigenfertigungsplanung und die Produktionsprogrammplanung. Zu den Querschnittsaufgaben gehören die Auftragskoordination, PPS-Controlling und das Lagerwesen. Um die logistischen Prozessketten zu verwalten, stellt die Datenverwaltung mit den Stamm- und Bewegungsdaten einen weiteren Bestandteil des Aachener Modells dar. Die Fertigungssteuerung auf welche sich diese Arbeit vorwiegend konzentriert, ist beim Aachener Modell im Bereich der Eigenfertigungsplanung und -steuerung unter-

<sup>15</sup> (Schuh, 2006, S. 21)

<sup>16</sup> (Lödding, 2005)

<sup>17</sup> (H.H.Wiendahl, Cieminski, & H.-P.Wiendahl, Stolpersteine der PPS, 1995, S. 2)

geordnet. Die Fertigungssteuerung ist nur ein kleiner Bestandteil des Aachener Modells, jedoch ein sehr wichtiger Aspekt hinsichtlich wettbewerbsorientierter Unternehmensführung.

## **2.1.1 Kernaufgaben**

### **2.1.1.1 Produktionsprogrammplanung**

Aufgabe der Produktionsprogrammplanung ist es, gemäß Absatzplan (Brutto-Primärbedarf) das Produktionsprogramm für ein Unternehmen zu erstellen. In die Absatzplanung fließen Daten der Kundenaufträge und Absatzprognosen ein. Die Produktionsprogrammplanung beinhaltet somit die Produkte, welche nach Art, Menge und Termin für einen definierten Planungszeitraum festgelegt sind. Ebenso müssen in der Produktionsprogrammplanung die weiteren Bedarfe wie z.B.: Ersatzteil, Demonstrations- oder Versuchsmuster beinhaltet sein. Wichtig ist es somit alle Bedarfe zu erfassen, um sie in die Produktionsplanung mit einfließen zu lassen.

Der Brutto-Primärbedarf wird anschließend mit dem Lagerbestand und etwaigen Sicherheitsbeständen abgeglichen um den Netto-Primärbedarf und somit das Produktionsprogramm zu erstellen.<sup>18</sup>

### **2.1.1.2 Produktionsbedarfsplanung**

In der Produktionsbedarfsplanung gilt es gemäß der Produktionsprogrammplanung den benötigten Material- und Ressourcenbedarf festzustellen. Im ersten Schritt ist es nötig den Sekundärbedarf an Bauteilen und Komponenten zu ermitteln und daraus Fertigungsaufträge zu generieren. Die Berechnung der einzelnen Bedarfe ist nicht Teil dieser Arbeit und wird daher nicht näher erläutert. Im zweiten Schritt werden die Fertigungsaufträge gemäß Auftragsstruktur terminiert und einer Kapazitätsplanung unterzogen. Aufgabe der Kapazitätsplanung ist es für alle Ressourcen (Maschinen, Personal...) den benötigten Kapazitätsbedarf zu ermitteln und mit dem zur Verfügung stehenden abzugleichen. Die Kapazitätsplanung beinhaltet unter anderem die Punkte der Durchlaufterminierung, Kapazitätsbedarfs-

---

<sup>18</sup> (Lödding, 2005, S. 81)

---

rechnung, Kapazitätsabstimmung und Beschaffungsartzuordnung (Selbst- oder Eigenfertigung).<sup>19</sup>

### **2.1.1.3 Eigenfertigungsplanung und -steuerung**

Da die Eigenfertigungsplanung und -steuerung den zentralen Aspekt dieser Arbeit darstellt, soll dieser Punkt des Aachener PPS- Modells nochmals gesondert hervorgehoben werden. Zu den Aufgaben der Eigenfertigung zählen die Losgrößenrechnung, Feinterminierung, Ressourcenfeinplanung, Reihenfolgebildung, Verfügbarkeitsprüfung und Auftragsfreigabe.<sup>20</sup> Die Losgröße ist in der Losgrößenrechnung festzustellen, es wird versucht die betriebswirtschaftlich optimale Losgröße zu erreichen. Da dies in den meisten Fällen nicht möglich ist, muss ein Kompromiss zwischen großen Losgrößen und hohen Beständen sowie kleinen Losgrößen und hohen Rüstkosten gefunden werden. Die Losgrößenrechnung stellt in der Fertigungssteuerung insofern einen wichtigen Bestandteil dar, da sie den Bestand in der Fertigung beeinflusst. In der Feinterminierung und Ressourcenfeinplanung gilt es die Arbeitsvorgänge zeitgenau auf die Betriebsressourcen (Maschinen, Betriebsmittel, Personal...) einzuplanen.<sup>21</sup> Es gilt somit das Ressourcenangebot mit dem Ressourcenbedarf zu vergleichen und in Einklang zu bringen. In unmittelbarem Zusammenhang mit der Feinterminierung, steht die Reihenfolgebildung der verschiedenen Aufträge. Durch die vor allem in der Werkstattproduktion schwankenden Auslastungen, kann es zu Warteschlangenbildung an den verschiedenen Arbeitssystemen kommen. In der Verfügbarkeitsprüfung gilt es somit vor Auftragsfreigabe zu überprüfen, ob die benötigten Ressourcen verfügbar sind. Andernfalls muss der Auftrag zurückgeschoben werden und kann zu diesem Zeitpunkt nicht freigegeben werden. Die Auftragsfreigabe erfolgt meist nach festgelegten Regeln wie z.B. belastungsorientierten oder kapazitätsorientierten Freigabemethoden. Da dieses Kapitel lediglich die Grundlagen und Zusammenhänge der PPS veranschaulichen soll, wurde nur sehr kurz auf die einzelnen Punkte der Eigenfertigungsplanung eingegangen.

---

<sup>19</sup> (Lödding, 2005, S. 83)

<sup>20</sup> (Schuh, 2006, S. 30 ff.)

<sup>21</sup> (Lödding, 2005, S. 90 ff.)

#### **2.1.1.4 Fremdbezugsplanung und -steuerung**

Ausgangspunkt der Fremdbezugsplanung ist die Produktionsbedarfsplanung. Darin wird festgelegt, welche Teile selbst oder fremd zu fertigen sind. Zu den Aufgaben der Fremdbezugsplanung und -steuerung gehören die Bestellrechnung, Angebotseinholung/ -bewertung, Lieferantenauswahl und Bestellfreigabe.<sup>22</sup>

Aufgabe der Bestellrechnung ist die Ermittlung der Bestellmengen zu gewissen Zeitpunkten. Es soll damit sichergestellt werden, dass die benötigten Produkte zur richtigen Zeit verfügbar sind.

Die Angebotseinholung und Lieferantenauswahl hängen stark miteinander zusammen. Es ist dabei zu erwähnen, dass hier nicht nur wirtschaftliche Aspekte der Angebotsauswahl im Vordergrund stehen sollen, sondern auch hingehend Qualität (Lieferservice, Nähe zum Produzent/ Kunden, Termintreue...).

Die Bestellfreigabe löst die Bestellung an die Lieferanten aus. Die Überprüfung der Lieferkonditionen( Termin, Qualität...) sind jedoch dem Auftragsmanagement oder Controlling untergeordnet.

### **2.1.2 Querschnittsaufgaben**

#### **2.1.2.1 Auftragskoordination**

In Produktionsunternehmen ist ein unzureichender Informationsfluss oftmals eine Schwachstelle als Folge eines ungenügenden Auftragsmanagements. Die Auftragskoordination hat vor allem bei komplexeren Aufträgen wie z.B. Anlagenbau große Bedeutung. Die Auftragskoordination umfasst die Koordination eines Auftrages über mehrere Unternehmensbereiche (Planung, Konstruktion, Produktion...) und über das Unternehmen hinweg. Die Auftragskoordination ist oft der erste Ansprechpartner für extern Beteiligte (Kunden, Partner, Lieferanten...). Das Auftragsmanagement ist somit in allen Phasen der Auftragsabwicklung von großer Relevanz. Die Auftragskoordination beinhaltet somit die Aufgaben der Angebotsbearbeitung, Auftragsklärung, Auftragsgrobterminierung, Ressourcengrobplanung und Auftragsführung.<sup>23</sup>

---

<sup>22</sup> (Schuh, 2006, S. 57 ff.)

<sup>23</sup> (Luczak & Eversheim, 1999, S. 53 ff)

### **2.1.2.2 Lagerwesen**

Die Aufgaben des Lagerwesens umfassen die Lagerverwaltung, Bestandsführung, Bestandsplanung, Bestandsanalyse und Chargenverwaltung.<sup>24</sup> Hauptaufgabe der Lagerverwaltung ist es die gelagerten Güter zu verwalten und immer auf aktuellem Stand zu halten, um bei Anfrage den aktuellen Lagerstand und -ort, zur Verfügung stellen zu können. Um dies zu gewährleisten werden in der Bestandsführung sämtliche Lagerbewegungen erfasst und mit dem PPS-System abgeglichen. Aufgabe der Bestandsplanung ist es, zu große Lagerbestände zu vermeiden und Fehlmengen zu verhindern. Die Bestandsanalyse beschäftigt sich damit das Lager wirtschaftlich möglichst effizient zu führen. Dabei werden Materialbestandslisten, Analyse von Umschlagshäufigkeiten oder Transportmittelnutzungsanalysen herangezogen. Die Chargenverwaltung ordnet jeden Teilbestand einer Charge (Produktion von Bauteilen gleicher Umstände) zu und verwaltet diesen. Zur Chargenverwaltung gehören u.a. Informationen wie Verfallsdatum, Wareneingangsdatum, Herkunftsland und Lagerbestand.

### **2.1.2.3 PPS-Controlling**

Aufgabe des PPS-Controllings ist es, die logistische Zielerreichung zu messen und Ursachen für die Planabweichungen darzustellen. Wichtiger Bestandteil des Controllings ist Ableitung von Maßnahmen zur Korrektur von Planabweichungen und deren anschließende Implementierung. Planungsgrundlage des Controllings sind sowohl die Plandaten der Produktionsplanung sowie aktuelle Rückmeldedaten der Fertigung bzw. aus den einzelnen Unternehmensbereichen. Das PPS-Controlling ist somit eine wichtige Schnittstelle zwischen der Produktionsplanung und betrieblichen Realität.

### **2.1.3 Datenverwaltung**

Aufgabe der Datenverwaltung ist die Speicherung und Verwaltung sämtlicher Daten (Stamm- und Bewegungsdaten). Die Datenverwaltung hat insofern eine wichtige Bedeutung beim Aachener PPS-Modell, da sämtliche Hauptfunktionen und Querschnittsfunktionen darauf zurückgreifen als auch für deren Planung unver-

---

<sup>24</sup> (Schuh, 2006, S. 64 ff)

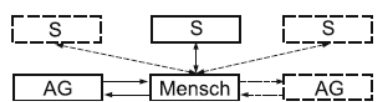
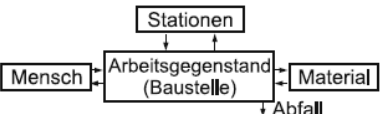
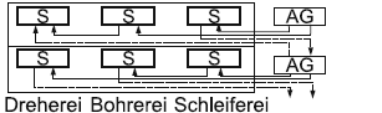
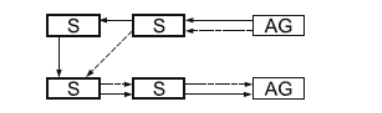
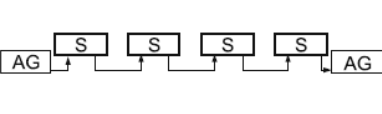
zichtbar sind. Aus diesem Grund ist eine möglichst hohe Datenqualität von großer Relevanz.

## 2.2 Steuerungsrelevante Fertigungsmerkmale

Wie in Kapitel 1.3 bereits erwähnt wurde, kann zwischen Lager- und Auftragsfertigung unterschieden werden. Nun gibt es jedoch weitere grundlegende Entscheidungsmerkmale welche die Fertigungssteuerung beeinflussen. Als bewährte Klassifizierungskriterien werden das Fertigungsprinzip, die Fertigungsart, die Art des Teileflusses, die Variantenanzahl, die Materialflusskomplexität und die Schwankung des Kunden- und Kapazitätsbedarfes herangezogen.<sup>25</sup>

### 2.2.1 Fertigungsprinzipien

Wie in untenstehender Abbildung ersichtlich ist, werden die Fertigungsprinzipien<sup>26</sup> nach ihrer räumlichen Struktur wie Werkbank-, Werkstätten-, Baustellen-, Insel- und Fließprinzip unterschieden.

Ordnungskriterium	Fertigungsprinzip	Räumliche Struktur	Beispiele
Mensch	Werkbankprinzip		Handwerkliche Arbeitsplätze Werkzeugmacherei
Produkt	Baustellenprinzip		Großmaschinenbau Schiffswerft
Arbeitsaufgabe	Verrichtungsprinzip oder Werkstättenprinzip		Dreherei Bohrerei Schleiferei Schweißwerkstatt
Arbeitsfolge einer Teilefamilie	Inselprinzip Gruppenprinzip		Fertigungsinsel Montageinsel Fertigungssegment
Arbeitsfolge definierter Varianten	Fließprinzip		Fertigungslinie Montagelinie

AG : Arbeitsgang S : Station

Abbildung 6: Ordnungskriterien für die Fertigungsprinzipien<sup>27</sup>

<sup>25</sup> (Lödding, 2005, S. 95)

<sup>26</sup> (Lödding, 2005, S. 95 ff)

<sup>27</sup> (Kettner, Schmidt, & Greim, 1984)

**Werkbankprinzip**

Beim Werkbankprinzip steht der Mensch im Zentrum der Betrachtung, der das Werkstück auf einer Werkbank bearbeitet. Falls erforderlich greift jener auf Maschinen zurück um die erforderlichen Arbeitsschritte durchzuführen. Diese Form der Fertigung wird in der Industrie vor allem für Montagetätigkeiten verwendet.

**Baustellenprinzip**

Das Prinzip der Baustellenfertigung wird vor allem im Großmaschinen- und Schiffsbau angewendet. Dabei werden die Fertigungsmittel (Mensch, Maschine...) zum Ort der Leistungserstellung gebracht. Durch die unterschiedlichen Arbeitsvorgangreihenfolgen hat die Produktionsplanung und -steuerung meist Projektcharakter.

**Werkstättenprinzip**

Dabei werden die Arbeitssysteme nach dem Verrichtungsprinzip angeordnet, d.h. gleichartige Arbeitssysteme werden räumlich zu einer Werkstatt zusammengefasst. Die Werkstücke durchlaufen die Werkstätten nacheinander und werden laut Produktionsplan bearbeitet. Vorteil der Werkstättenfertigung ist die Flexibilität, Werkstücke mit wechselnden Bearbeitungsfolgen können problemlos gefertigt werden. Nachteil wiederum sind durch den oftmaligen Transport von Werkstücken und Umrüstzeiten lange Durchlaufzeiten.

**Fließfertigung**

Hierbei werden alle Arbeitsschritte genau geplant und die Maschinenanordnung wird dem Materialfluss genau angepasst. Im Gegensatz zur Werkstättenfertigung werden die Werkstücke nach Beendigung des Arbeitsvorganges sofort zum nächsten Arbeitsschritt weitergeleitet, was zu einer sehr kurzen Durchlaufzeit führt. Jene Fertigungsmethode ist mit einem hohen Planungsaufwand verbunden, da alle Arbeitsschritte aufeinander abgestimmt werden müssen, um einen ständigen Materialfluss zu gewährleisten. Der Automatisierungsgang ist sehr hoch, was zu einer geringen Flexibilität führt. Diese Methode wird vor allem in der Massenfertigung eingesetzt, wo nur eine geringe Variantenanzahl gefertigt werden muss.



## Inselfertigung

Die Inselfertigung steht zwischen Werkstätten- und Fließfertigung. Die Anordnung der Arbeitssysteme erfolgt ebenfalls nach dem Materialfluss meist in Form eines U's, die Anforderungen gemäß Taktung sind aber nicht so hoch wie bei der Fließfertigung. Der Automatisierungsgrad ist wesentlich geringer, somit kommt dem Mitarbeiter wieder mehr Bedeutung zu. Er kann häufig alle Arbeitssysteme in der Fertigungsinsel bedienen sowie rüsten und somit den Fertigungsprozess beeinflussen.

### 2.2.2 Fertigungsarten

Wie in untenstehender Abbildung ersichtlich ist, können die Fertigungsarten<sup>28</sup> nach der durchschnittlichen Auflagenhöhe (Losgröße) und Wiederholhäufigkeit klassifiziert werden. Dabei unterscheidet Schomburg die vier Fertigungsarten Einzelfertigung, Einzel- und Kleinserienfertigung, Serienfertigung und Massenfertigung.

Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung
Kriterien • durchschnittliche Auflagenhöhe der Erzeugnisse • durchschnittliche Wiederholhäufigkeit pro Jahr			
Auflagenhöhe gering; keine Wiederholung	Auflagenhöhe < 50; Wiederholhäufigkeit < 12	Auflagenhöhe > 50; Wiederholhäufigkeit < 24	sehr große Auflagenhöhe; Fertigung ununterbrochen

Abbildung 7: Merkmalsausprägungen der Fertigungsarten<sup>29</sup>

### Einmalfertigung

Die Einmalfertigung zeichnet sich durch eine geringe Auflagenhöhe, d.h. es wird nur ein sehr kleines Los gefertigt und die Wiederholhäufigkeit = 1. Die Einmalfertigung wird meist mit den Fertigungsprinzipien der Werkstätten- oder Baustellenfertigung realisiert.

<sup>28</sup> (Lödding, 2005, S. 97 ff.)

<sup>29</sup> (Schomburg, 1980)

### **Einzel- und Kleinserienfertigung**

Auch hier dominiert eine eher kleine Auflagenhöhe und geringe Wiederholhäufigkeit. Bei ihr wird wie bei der Einmalfertigung meist auf das Fertigungsprinzip der Werkstättenfertigung zurückgegriffen. In der Regel wird hier auf Kundenauftrag gefertigt.

### **Serienfertigung**

In der Serienfertigung nimmt die Auflagenhöhe und Wiederholhäufigkeit zu. Der Anteil der Inselfertigung nimmt im Gegensatz zum Anteil der Werkstättenfertigung zu. Typisch sind Mischfertiger, welche zum Teil lagerbezogen aber auch kundenauftragsbezogen fertigen.

### **Massenfertigung**

Die Auflagenhöhe ist sehr groß und es existiert ein unterbrochener Fertigungsfluss. In der Regel ist diese Fertigungsart in einer Fließfertigung organisiert. Typische Vertreter sind sogenannte Lagerfertiger. Aufgrund der zunehmenden Variantenvielfalt wird diese Fertigungsart aber immer weniger.

## **2.2.3 Art des Teileflusses**

Die Art des Teileflusses<sup>30</sup> hat enorm großen Einfluss auf die Bestände und somit die Durchlaufzeiten in einer Fertigung. In der Regel können die vier Möglichkeiten Losweiser Transport, One-piece-flow, Überlappte Fertigung und Chargenfertigung des Teileflusses unterschieden werden.

### **Losweiser Transport**

Bei dieser Art des Teileflusses, wird immer ein komplettes Los an einem Arbeitssystem abgearbeitet, d.h. das erste Werkstück wartet so lange bis das letzte Werkstück des Loses bearbeitet wurde und wird erst dann als gesamtes Los weitergegeben.

---

<sup>30</sup> (Lödding, 2005, S. 98 ff)

Problem des Losweisen Transportes sind die langen Wartezeiten der einzelnen Werkstücke und die damit verbundene lange Durchlaufzeit. Eine Verkürzung der Durchlaufzeit ist somit nur möglich nur durch eine Verkleinerung der Losgröße oder das Aufheben der Restriktion des Losweisen Transportes möglich.

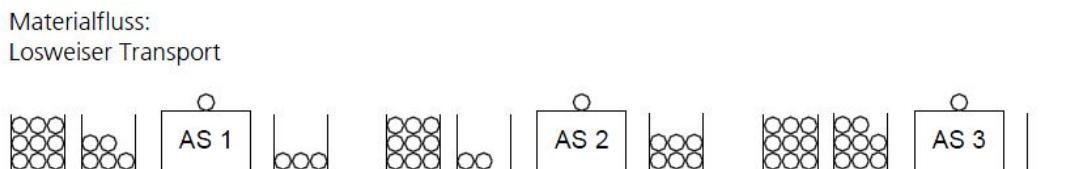


Abbildung 8: Losweiser Materialtransport<sup>31</sup>

### One-piece-flow

Beim One-piece-flow wird ein Werkstück im Idealfall direkt nach der Bearbeitung an einem Arbeitssystem an das nächste Arbeitssystem weitergegeben. Bei dieser Art des Teileflusses wird die Einheit von Fertigungs- und Transportlos getrennt, das heißt aber nicht, dass dies mit der Aufhebung des Fertigungsloses verbunden ist. Ebenso wenig ist das One-piece-flow-Prinzip an ein bestimmtes Fertigungsprinzip gebunden. Daher ist es auch denkbar, es in einer Werkstättenfertigung einzusetzen, wo bestimmte Arbeitssysteme oft in derselben Reihenfolge durchlaufen werden.

Großer Vorteil des one-piece-flow-Prinzips ist die geringe Durchlaufzeit der einzelnen Werkstücke, durch den ständigen Materialfluss. Problem beim one-Piece-flow sind zwangsläufig auftretende Verkettungsverluste, d.h. der längste Arbeitsschritt gibt den Takt vor, was zu Leitungsverlusten bei den anderen Arbeitssystemen führen kann.

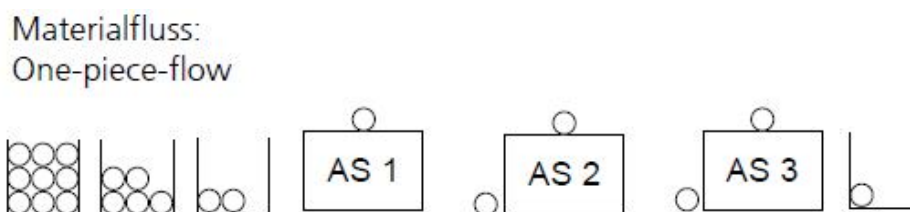


Abbildung 9: One-piece-flow -Prinzip<sup>32</sup>

<sup>31</sup> (Schuh, 2006)

<sup>32</sup> (Schuh, 2006)

## Überlappte Fertigung

Eine Mischform des One-piece-flow und des losweisen Transports stellt die überlappte Fertigung dar. Bei dieser Form des Mengentransportes wird eine bereits bearbeitete Teilmenge eines Loses zum nachfolgenden Arbeitssystem transportiert und dort weiterbearbeitet.

Diese Methode wird aus zwei unterschiedlichen Gründen angewendet. Zum einen wird sie dazu verwendet um Aufträge gezielt zu beschleunigen und somit Eilaufträge so schnell wie möglich zu fertigen. Zum anderen wird sie eingesetzt um die erreichbaren Durchlaufzeiten zu verkürzen und somit die Bestände zu reduzieren.

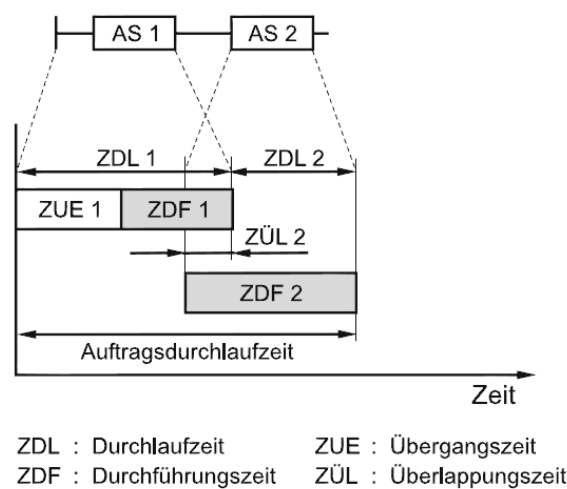


Abbildung 10: Überlappte Fertigung von Aufträgen<sup>33</sup>

## Chargenfertigung

Im Zuge der Chargenfertigung werden mehrere Lose, welche dem gleichen Chargentyp angehören, gemeinsam bearbeitet, d.h. sie müssen unter denselben Prozessbedingungen hergestellt werden. Ein typisches Beispiel für die Chargenfertigung stellen Ofenprozesse dar, es werden meist so viele Aufträge mit der gleichen Ofentemperatur und Laufdauer zusammengefasst, bis eine Ofenladung komplett ist. Die Chargenfertigung verursacht durch lange Wartezeiten hohe Bestände und Durchlaufzeiten. Wenn möglich sollte eine Chargenproduktion daher vermieden werden. Häufig ist dies durch Technologieverbesserungen zu erreichen. (Beispiel: Induktives Oberflächenhärten ersetzt Wärmebehandlung im Ofen)

<sup>33</sup> (Lödding, 2005, S. 101)

## 2.2.4 Die Variantenanzahl

Die Variantenanzahl<sup>34</sup> hat auf die Fertigungssteuerung großen Einfluss und ist somit ein wichtiges Merkmal zur Klassifizierung. Je komplexer die Produktstruktur (Variantenanzahl) umso schwieriger ist es die Fertigungssteuerung zu beherrschen. Durch steigende Variantenanzahl lässt sich der Einsatz komplexer PPS-Software meist nicht mehr umgehen. Die Variantenanzahl hat auch großen Einfluss auf das Fertigungsprinzip, da die Automatisierung von Fertigungsprozessen zunehmend schwieriger wird. Die Realisierung einer getakteten Fließfertigung wird somit immer schwieriger. Vorteilhaft wäre es natürlich die Variantenanzahl so gering wie möglich zu halten. Die Entwicklung der Kundenwünsche geht jedoch Richtung kundenindividuelles Endprodukt womit sich die Variantenanzahl ständig erhöht. Für die Fertigungssteuerung ist es somit von entscheidender Bedeutung, inwieweit sich die Variantenvielfalt auf die Erzeugnisebene in der Fertigung auswirkt. Ziel sollte es sein, die Varianten in der Fertigung zu einem so spät wie möglichen Zeitpunkt zu bilden. Hinsichtlich wettbewerbsorientierten Aspekten, nimmt die Bedeutung in der Beherrschung von variantenreicher Fertigung somit stetig zu.

## 2.2.5 Materialflusskomplexität

Eng verbunden mit der Variantenanzahl ist die Materialflusskomplexität<sup>35</sup>. Wie in Abbildung 11 ersichtlich ist, nimmt der Komplexitätsgrad des Materialflusses mit den Vorgänger- und Nachfolgearbeitssystemen und Anzahl der Rückflüsse zu.

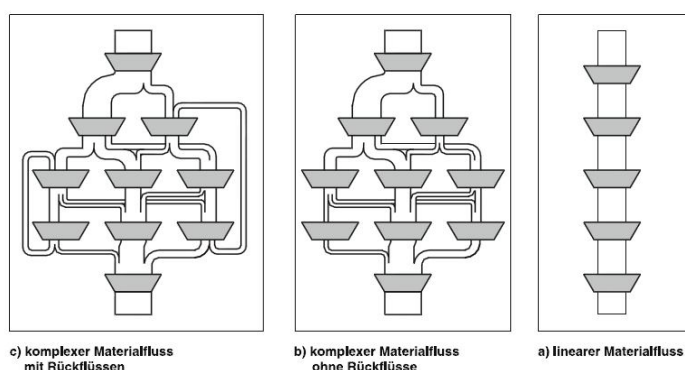


Abbildung 11: Materialflusskomplexität<sup>36</sup>

<sup>34</sup> (Lödding, 2005, S. 103 ff)

<sup>35</sup> (Lödding, 2005, S. 104 ff)

<sup>36</sup> (Lödding, 2005, S. 105)

Anhand verschiedener Kennzahlen gibt es die Möglichkeit die Materialflusskomplexität zu messen und zu bewerten.<sup>37</sup> Bezüglich der verschiedenen Fertigungssteuerungsverfahren wirkt sich die Materialflusskomplexität direkt auf deren Eignung aus. Es werden z.B. im Bereich der Auftragsfreigabe Reihenfolgevertauschungen vorgenommen um eine homogenere Auslastung zu erreichen. Im Weiteren beeinflusst sie die Wahl des Teileflusses, bei komplexeren Materialflüssen ist ein one-piece-flow-Prinzip aus Gründen des Layouts oft schon nicht möglich. Es gilt somit, je geringer die Materialflusskomplexität, umso einfacher ist jene zu steuern. Durch geeignete Planungs- und Steuerungsmaßnahmen sollte somit das Ziel angestrebt werden, die Materialflusskomplexität so gering wie möglich zu halten.

### **2.2.6 Schwankungen des Kunden- und Kapazitätsbedarfes**

Bedarfsschwankungen entstehen in der Regel dadurch, dass die Kunden Produkte nicht gleichmäßig nachfragen<sup>38</sup>. Durch Bedarfsschwankungen kommt es in der Fertigung ebenso zu Kapazitätsschwankungen. Steigt die Nachfrage, resultiert daraus ein steigender Wettbewerb um die vorhandenen Kapazitäten.

Um den Schwankungen des Kapazitätsbedarfes gerecht zu werden, verfügen Unternehmen über zwei Möglichkeiten. Sie können ihre Kapazitätsflexibilität nutzen um den Schwankungen zu folgen oder sie setzen ihre Belastungsflexibilität ein um die Schwankungen zu verringern. Lödding definiert wie folgt:

„Kapazitätsflexibilität ist die Fähigkeit, die Kapazitäten schnell und kostengünstig an einen geänderten Kapazitätsbedarf anzupassen. Belastungsflexibilität ist die Fähigkeit, die Belastung an die verfügbare Kapazität anzupassen.“

Die Fragestellung der Kunden- und Kapazitätsbedarfes ist Thema des Supply-Chain-Managements, im Sinne der gesamtbetrieblichen Zielerreichung.

---

<sup>37</sup> (Bornhäuser, 2009, S. 31)

<sup>38</sup> (Lödding, 2005, S. 105 ff)

### 2.2.7 Matrix für steuerungsrelevante Fertigungsmerkmale

Mit den Klassifizierungsregeln welche im vorigen Kapitel erläutert wurden, lässt sich nun eine Matrix zusammenstellen, um das Unternehmen einer ersten Kategorisierung zu unterziehen.

Kriterium	Ausprägungen				
	Werkbank-prinzip	Baustellen-prinzip	Werkstätten-prinzip	Insel-fertigung	Fließfer-tigung
Fertigungsprinzip	Einmalferti-gung	Einzel- und Kleinserien-fertigung	Serien-fertigung	Massen-fertigung	
Fertigungsart	Chargen-fertigung	Losweiser Transport	Überlappte Fertigung	One-piece-fow	
Teilefluss	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Variantenanzahl	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Materiafluss-komplexität	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Schwankungen des Kapazitäts-bedarfs	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Kapazitäts-flexibilität	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Belastungs-flexibilität	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch

**Tabelle 1: Steuerungsrelevante Fertigungsmerkmale**

Die vorliegende Arbeit befasst sich im Vorwiegenden mit dem Werkstättenprinzip und der Einzel- und Kleinserienfertigung. In der weiteren Vorgehensweise werden somit für jenes Fertigungsprinzip Lösungsvorschläge herausgearbeitet um sie anschließend praxisgerecht anwenden zu können.

### 3 Modell der Fertigungssteuerung

Das Fertigungssteuerungsmodell nach Lödding stellt die Zusammenhänge der Fertigungssteuerung dar und steht somit in unmittelbarem Zusammenhang des MRP II (Manufacturing Resource Planning) Ansatzes. Das MRP II Grundkonzept hat vor allem Bedeutung in der Produktherstellung mit geringer Wiederholhäufigkeit und ist somit für diese Arbeit von großer Relevanz. Im Gegensatz zum herkömmlichen MRP (Material Requirements Planning) Ansatz wird beim MRP II Ansatz nicht nur die Materialbedarfsplanung in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt, sondern es wird ein mehrstufiger Ansatz der Produktionsplanung herangezogen und betrachtet zusätzlich wirtschaftliche und strategische Gesichtspunkte.

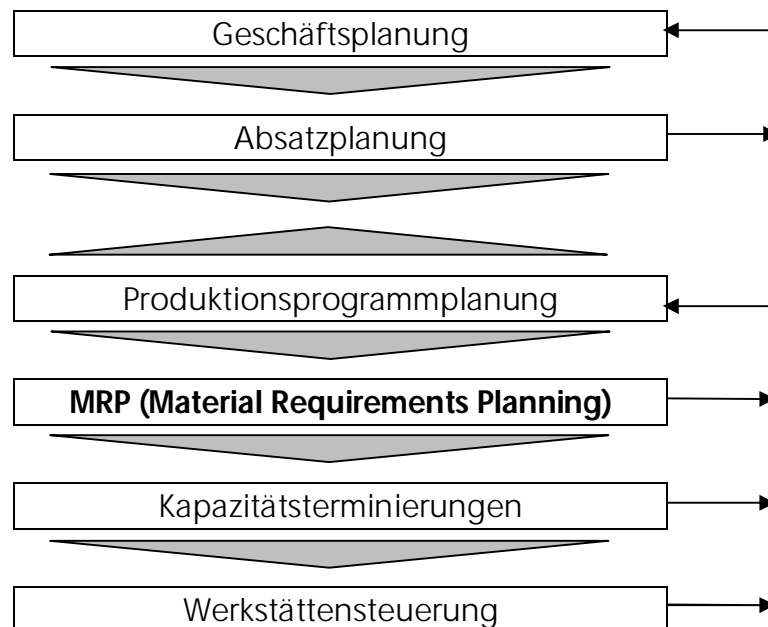


Abbildung 12: MRP II Konzept<sup>39</sup>

Das Fertigungssteuerungsmodell nach Lödding beschreibt die Wechselwirkungen zwischen den 4 Aufgaben der Fertigungssteuerung (Auftragserzeugung, Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung) und den logistischen Zielgrößen (Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung und Termintreue).

Die Aufgaben legen die sogenannten Stellgrößen (Istzugang, -abgang, -reihenfolge und Planzugang, -abgang, -reihenfolge) fest. Durch die Abweichun-

<sup>39</sup> (Scheer, 1990)



gen der Stellgrößen ergeben sich die Regelgrößen, welche somit Einfluss auf die logistischen Zielgrößen haben.

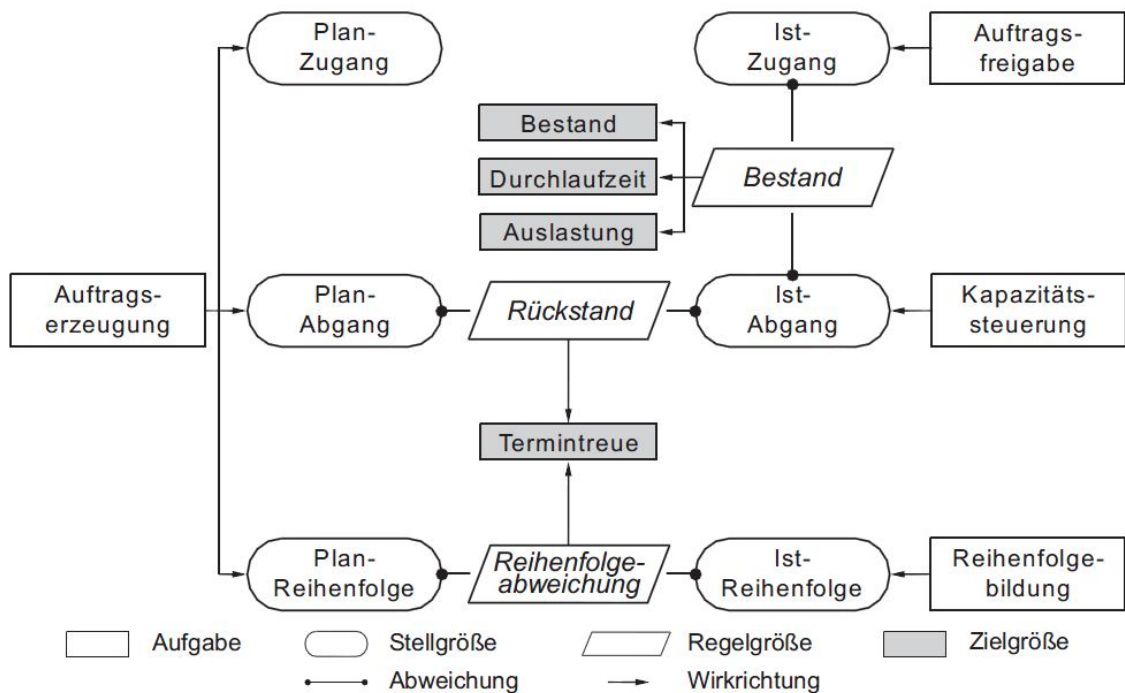


Abbildung 13: Modell der Fertigungssteuerung<sup>40</sup>

## Aufgaben

Die Auftragserzeugung ist traditionellerweise Teil der Produktionsplanung und legt die Planwerte (Planzugang, -abgang und -reihenfolge) fest. Sie hat durch die Reihenfolgeabweichung und den Rückstand vorwiegend Einfluss auf die Termintreue. Die Auftragserzeugung umfasst oft viele Unteraufgaben wie Produktionsprogrammplanung, Sekundärbedarfsermittlung und die Termin- und Kapazitätsplanung.<sup>41</sup>

Die Auftragsfreigabe bestimmt zu welchem Zeitpunkt ein Auftrag in die Fertigung eingespeist wird, also ihre Bearbeitung beginnen kann. Sie legt somit den Istzugang fest und hat über die Regelgröße Bestand Einfluss auf die logistischen Zielgrößen (Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung).<sup>42</sup>

Die Kapazitätssteuerung legt die Höhe der Kapazität fest und bestimmt die Arbeitszeiten und Arbeitspläne der Mitarbeiter. Sie beeinflusst somit den Istabgang

<sup>40</sup> (Lödding, 2005, S. 7)

<sup>41</sup> (Nyhuis.P., Begemann.C, Berkholz.D, & Hasenfuß.K, 2006, S. 195)

<sup>42</sup> (Nyhuis.P., Begemann.C, Berkholz.D, & Hasenfuß.K, 2006, S. 196)

der Fertigung und wirkt sich als einziges über Bestand und Rückstand auf alle vier Zielgrößen aus.<sup>43</sup>

Die Reihenfolgebildung bestimmt die Reihenfolge an der an einem Arbeitssystem die Aufträge abgearbeitet werden. Gemäß den logistischen Zielsetzungen werden die Aufträge in den Warteschlangen nach gewissen Kriterien sortiert. Sie wirkt sich über die Regelgröße Reihenfolgeabweichung auf die Termintreue aus.<sup>44</sup>

### **Stellgrößen**

Die Stellgrößen in der Fertigungsteuerung sind der Zugang, Abgang und die Reihenfolge, in der die Aufträge abgearbeitet werden. Die Zugänge werden durch die Arbeit, die der Fertigung in Form von Aufträgen mit einer bestimmten Vorgabezeit zugeht, beschrieben. Sowohl die Zugänge wie Abgänge können durch den Betrag und Zeitpunkt der Arbeit beschrieben werden. Die Stellgröße der Reihenfolge definiert, wann die Aufträge abgearbeitet werden.<sup>45</sup>

### **Regelgrößen**

Die Regelgrößen definieren sich über die Differenz von zwei Stellgrößen. Die Differenz zwischen Istzugang und Istabgang gibt den Bestand einer Fertigung wieder. Die Regelgröße Bestand hat Einfluss auf die Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung. Der Rückstand definiert sich aus Istabgang und Planabgang und beeinflusst somit maßgeblich die Termintreue. Ebenso wirkt sich die Reihenfolgeabweichung auf die Termintreue aus, welche sich aus Planreihenfolge und Istreihenfolge ergibt.<sup>46</sup>

### **Logistische Zielgrößen**

Das Modell beinhaltet die vier grundlegenden logistischen Zielgrößen wie Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung und Termintreue. Der Bestand gibt an wie viel Kapital im Umlauf ist und wie viel Stellfläche in der Produktion benötigt wird. Die Auslastung gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Arbeitssystem nicht arbeiten kann, weil kein Auftrag vorhanden ist. Die Durchlaufzeit gibt die

---

<sup>43</sup> (Lödding, 2005, S. 7)

<sup>44</sup> (Nyhuis.P., Begemann.C, Berkholz.D, & Hasenfuß.K, 2006, S. 196)

<sup>45</sup> (Lödding, 2005, S. 8)

<sup>46</sup> (Lödding, 2005, S. 8)

---

Zeitdauer von Auftragsfreigabe bis Fertigstellung wieder. Die Termintreue gibt den prozentuellen Anteil der fertiggestellten Aufträge innerhalb einer bestimmten Frist wieder.<sup>47</sup>

Für die Praxis scheint das Modell der Fertigungssteuerung für folgende vier Punkte bedeutsam zu erscheinen:<sup>48</sup>

**Analyse mangelnder Zielerreichung:** Mit dem Modell der Fertigungssteuerung ist eine systematische Analyse der Zielerreichung möglich. Überhöhte Bestände und Durchlaufzeiten oder eine niedrige Auslastung sind auf eine unzureichende Abstimmung der Istzugänge und Istabgänge zurückzuführen. Eine niedrige Termintreue ist vom Rückstand und Reihenfolgeabweichung geprägt. Im Falle des Rückstandes muss der Planabgang und Istabgang besser aufeinander abgestimmt werden. Für Reihenfolgeabweichungen gilt es die Reihenfolgebildung näher zu betrachten.

**Gestaltung einer Fertigungsregelung:** Das Modell zeigt auf, dass eine Bestandsregelung die Auftragsfreigabe nutzt um den Istzugang und Istabgang zu koppeln. Über eine Bestandsregelung lassen sich Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung steuern. Eine Rückstandsregelung steuert die Kapazitäten und wirkt sich somit wiederum auf die Termintreue aus. Das Modell schafft somit Ansatzpunkte um Verbesserungspotentiale zu erkennen und anschließend gezielte Steuerungsmaßnahmen umzusetzen.

**Aufbau eines Systemverständnisses:** Das Modell schafft ein grundlegendes Verständnis der Fertigungssteuerung indem es den logischen Zusammenhang zwischen Aufgaben und logistischen Zielgrößen darstellt. Angemerkt werden soll bei diesem Punkt, dass das Modell nur interne und keine externen Zielgrößen abbildet.

**Unterscheidung zwischen Planung und Steuerung:** Das Modell zeigt sehr schön den Unterschied zwischen der Produktionsplanung welche die Planwerte der Stellgrößen festlegt und die Fertigungssteuerung die tatsächlichen Istwerte. Dies widerspiegelt die vermutlich hohe Bedeutung der Fertigungssteuerung.

---

<sup>47</sup> (Lödding, 2005, S. 8)

<sup>48</sup> (Lödding, 2005, S. 9)

## 4 Logistische Zielgrößen

In diesem Abschnitt werden die internen und externen logistischen Zielgrößen beschrieben. Jene Kennzahlen stellen die Grundlage zur mathematischen Modellierung von Produktionsprozessen dar. Sie machen den Produktionsprozess somit analytisch messbar und haben großen Anteil an der wirtschaftlichen Entscheidungsfindung.

### 4.1 Externe logistische Zielgrößen

Die externen logistischen Zielgrößen sind jene Größen die nach außen hin messbar sind und der Kunde somit direkt in Kontakt kommt. Dazu zählen die Lieferzeit, Lieferterminabweichung, Liefertreue und der Servicegrad.<sup>49</sup>

#### Lieferzeit

Als Lieferzeit wird die Dauer zwischen Auftragseingang und -ausgang definiert und hängt in starkem Maße von der Bevorratungsstrategie ab. (vgl. Abb. 3). Bei reinen Lagerfertigern ergibt sich die Lieferzeit aus dem Versand der Ware. Bei Auftragsfertigern kommen verschiedene Zeitanteile (siehe Formel 4.1) hinzu, wodurch das Unternehmen die Lieferzeit nicht mehr allein beeinflussen kann.<sup>50</sup>

$$\mathbf{ZL = ZDL + ZB + ZLP + ZV + BV + ZAD} \quad (4.1)$$

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

<sup>49</sup> (Wiendahl, 1997)

<sup>50</sup> (Lödding, 2005, S. 40)

Unbestritten gilt, je kürzer die Lieferzeit und damit verbunden eine flexible Fertigung umso erfolgreicher wird sich ein Unternehmen am Markt positionieren können. Wie Abb. 1 zeigt nimmt die Lieferzeit einen immer größeren Stellenwert beim Kunden ein. Empirische Studien zeigen, dass Unternehmen mit kurzen Lieferzeiten schneller wachsen und höhere Gewinne erwirtschaften können.<sup>51</sup>

### Lieferterminabweichung

Die Lieferterminabweichung ist die Differenz zwischen Plan- und Istliefertermin.<sup>52</sup>

$$LTA = TL_{Ist} - TL_{Plan} \quad (4.2)$$

mit	LTA	Lieferterminabweichung [BKT]
	$TL_{Ist}$	Ist- Liefertermin [BKT]
	$TL_{Soll}$	Soll-Liefertermin [BKT]

Gemäß dieser Definition beschreibt ein positives Vorzeichen eine verspätete Lieferung, ein negatives Vorzeichen eine verfrühte Lieferung.

### Liefertreue

Die Liefertreue gibt jenen Anteil wieder, welcher in einer definierten Liefertermin-toleranz geliefert wurde.<sup>53</sup>

$$LT = \frac{\text{AnzAuf mit } LTA_{UG} \leq LTA \leq LTA_{OG}}{\text{AnzAuf}} \cdot 100 \quad (4.3)$$

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

<sup>51</sup> (Lödding, 2005, S. 21)

<sup>52</sup> (Lödding, 2005, S. 24)

<sup>53</sup> (Lödding, 2005, S. 24ff.)

---

Die Liefertreue wird stets in definierten Bezugszeitraum betrachtet, wobei die Unter- und Obergrenzen für die Terminabweichungen abweichen können.

### **Servicegrad**

Der Servicegrad ist eine der wichtigsten externen Zielgrößen und stellt den Anteil befriedigter Anfragen gegenüber allen gestellten Anfragen dar. Er gibt somit den prozentuellen Anteil der befriedigten Anfragen wieder.<sup>54</sup>

$$\mathbf{SG} = \frac{\mathbf{AnzNF}_{\text{sofort}}}{\mathbf{AnzNF}} \cdot \mathbf{100} \quad (4.4)$$

mit SG Servicegrad [%]  
AnzNF<sub>sofort</sub> Anzahl sofort befriedigter Nachfragen  
AnzNF Anzahl der Nachfragen

Bei Nichtverfügbarkeit des Produktes wirkt sich dies direkt auf den Servicegrad eines Unternehmens aus, was unmittelbar mit Umsatzverlusten verbunden ist. Der Servicegrad wirkt sich daher wesentlich mehr auf Umsatzwachstum und Gewinn aus wie etwa die Liefertreue.

Um eine möglichst hohe Zielerreichung der externen logischen Zielgrößen zu erreichen, werden nun die internen logistischen Zielgrößen abgeleitet und erklärt, welche für eine möglichst hohe Kundenzufriedenheit unabkömmlich sind.

---

<sup>54</sup> (Lödding, 2005, S. 27f.)

## 4.2 Interne logistische Zielgrößen

Die internen logistischen Zielgrößen umfassen das Trichtermodell und das daraus abgeleitete Durchlaufdiagramm. Teil der internen Zielgrößen stellen auch die Produktionskennlinien dar, welche auf den Grundlagen des Trichtermodells und den daraus abgeleiteten Größen beschrieben werden. Um die Produktionskennlinien von Grund auf verständlich darzustellen, werden nun die Grundbegriffe erklärt und deren Wirkzusammenhänge beschrieben.

### 4.2.1 Trichtermodell

Um einen Produktionsprozess zu beschreiben, wird das Hanoveraner Trichtermodell herangezogen, welches in der Fachwelt als sehr anerkannt gilt. Damit lässt sich jedes Arbeitssystem egal ob Einzelarbeitsplatz, gesamte Fertigungsstraße oder Kostenstelle im Sinne eines Fließprozesses beschreiben. Das System wird durch die Größen Zugang, Bestand und Abgang im Durchlaufverhalten beschrieben.<sup>55</sup>

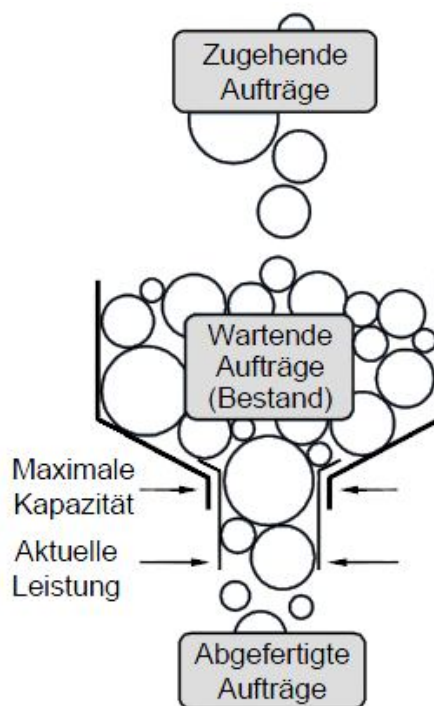


Abbildung 14: Trichtermodell<sup>56</sup>

<sup>55</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 24 ff.)

<sup>56</sup> (Bechte, 1984)

Wie in zuvor stehender Abbildung ersichtlich ist, kann die Produktion in sehr vereinfachter Form als Trichter dargestellt werden. Die zugehenden Aufträge (Zugang) bilden mit den schon im Arbeitssystem befindlichen Aufträgen den Bestand eines Arbeitssystems. Die Bearbeitung eines Auftrages wird durch das Abfließen durch den Trichter dargestellt und als Abgang bezeichnet. Die Leistung (Output, Ausbringung) wird durch Trichteröffnung symbolisiert, die innerhalb der Kapazitätsgrenzen variiert werden kann.

Die grundlegenden Größen, welche dem Trichtermodell zugrunde liegen und für die weiteren Modellierungsansätze unabkömmlich sind, sollen nun kurz erläutert werden:<sup>57</sup>

#### 4.2.1.1 Auftragsstrukturkennzahlen:

Die Auftragszeit ist die Vorgabezeit, welche für die Ausführung eines Arbeitsvorganges an einem Arbeitssystem benötigt wird. Sie stellt die Ausgangsgröße für das Trichtermodell und somit für alle weiteren Berechnungen dar. Sie ergibt sich aus dem Anteil der vorgegebenen Bearbeitungszeit und der Rüstzeit.

$$\mathbf{ZAU} = \frac{(x \cdot t_e + t_r)}{60} \quad (4.5)$$

mit	ZAU	Auftragszeit eines Arbeitsvorganges [Std]
	x	Losgröße [ME]
	t <sub>e</sub>	Einzelzeit je Mengeneinheit [min/ME]
	t <sub>r</sub>	Rüstzeit je Los [min]

Mithilfe der Auftragszeit lässt sich die Durchführungszeit eines Arbeitsvorganges berechnen, welche das Verhältnis der Auftragszeit zur maximalen Leistung darstellt.

---

<sup>57</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 17 ff.)



$$\mathbf{ZDF} = \frac{\mathbf{ZAU}}{L_{\max}} \quad (4.6)$$

mit	ZDF	Durchführungszeit [BKT]
	ZAU	Auftragszeit [Std]
	$L_{\max}$	maximal mögliche Leistung [Std/ BKT]

Da die Auftragszeiten in der betrieblichen Praxis oftmals sehr streuen, wird zunächst die mittlere Auftragszeit benötigt um die Modellierung fortzusetzen.

$$\mathbf{ZAU}_m = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{ZAU}_i}{n} \quad (4.7)$$

mit	$\mathbf{ZAU}_m$	mittlere Auftragszeit [Std]
	$\mathbf{ZAU}_i$	individuelle Auftragszeit des Arbeitsvorganges i [Std]
	n	Anzahl der Arbeitsvorgänge

Mithilfe der mittleren Auftragszeit lässt sich nun die Standardabweichung der Auftragszeit, welche die Streubreite der Verteilung beschreibt, errechnen.

$$\mathbf{ZAU}_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mathbf{ZAU}_m - \mathbf{ZAU}_i)^2}{n}} \quad (4.8)$$

mit	$\mathbf{ZAU}_s$	Standardabweichung der Auftragszeit [Std]
	$\mathbf{ZAU}_m$	Mittelwert der Auftragszeit [Std]
	$\mathbf{ZAU}_i$	Auftragszeit des Arbeitsvorganges [Std]
	n	Anzahl der Arbeitsvorgänge

Um verschiedene Verteilungen vergleichen zu können, wird der Variationskoeffizient herangezogen. Jener bezieht die Standardabweichung der Auftragszeit auf ihren Mittelwert.

$$ZAU_v = \frac{ZAU_s}{ZAU_m} \quad (4.9)$$

mit  $ZAU_v$  Variationskoeffizient der Auftragszeit  
 $ZAU_s$  Standardabweichung der Auftragszeit [Std]  
 $ZAU_m$  Mittelwert der Auftragszeit [Std]

#### 4.2.1.2 Durchlaufzeitkennzahlen:

Eine weitere wichtige Größe des Trichtermodells stellt die Durchlaufzeit eines Auftrages dar. Die Durchlaufzeit stellt die Gesamtdauer dar (Ist- oder Sollzeit), welche zur Erfüllung einer Aufgabe, in einem oder mehreren Arbeitssystemen, benötigt wird dar.<sup>58</sup>

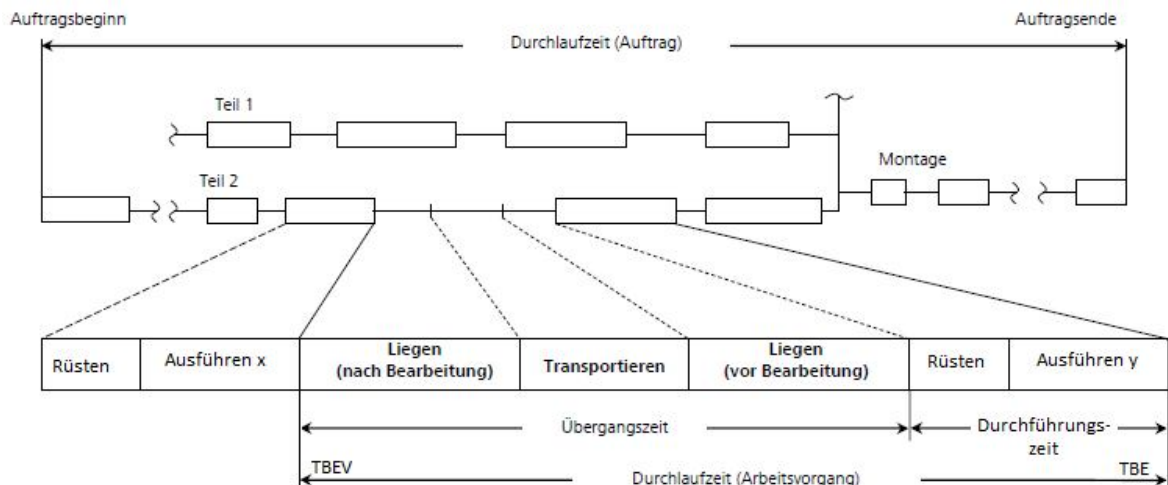


Abbildung 15: Zeitanteil der Durchlaufzeit<sup>59</sup>

Wie in Abbildung 15 ersichtlich ist, gehören zur Durchlaufzeit somit nicht nur Elemente der Bearbeitungszeit sondern auch der Transport-, Liege- oder Rüstzeit. Eine differenzierte Sichtweise der Durchlaufzeit ergibt sich durch deren Betrachtung, makroskopische (auftragsbezogene) oder mikroskopische (arbeitsplatzbezogene) Sichtweise. Anzumerken gilt hier, dass die Formeln 4.5 und 4.6 nicht nur für Einzelwerte je Arbeitsvorgang, sondern auch für mehrere Arbeitsvorgänge durch deren einfache Mittelwertberechnung gelten. Die Berechnung der Durchlaufzeit für den einzelnen Arbeitsvorgang lautet wie folgt:

<sup>58</sup> (Auer & Minichmayer, 2010, S. 53)

<sup>59</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 22)

$$\mathbf{ZDL = TBE - TBEV} \quad (4.10)$$

mit	ZDL	Durchlaufzeit [BKT]
	TBE	Termin Bearbeitungsende des Arbeitsvorganges [BKT]
	TBEV	Bearbeitungsende des Vorgängerarbeitsvorganges [BKT]

Als weitere Kennzahl des Trichtermodells lässt sich die Übergangszeit definieren. Jener Anteil der Durchlaufzeit, welcher zwischen zwei Arbeitsvorgängen liegt, wird als Übergangszeit bezeichnet. Die Übergangszeit errechnet sich aus der Differenz der Durchlaufzeit und der Durchführungszeit

$$\mathbf{ZUE = ZDL - ZDF} \quad (4.11)$$

mit	ZUE	Übergangszeit [BKT]
	ZDL	Durlaufzeit [BKT]
	ZDF	Durchführungszeit [BKT]

Aufgrund der zuvor Ermittelten Kennzahlen kann nun eine sehr aussagekräftige Kennzahl der Flussgrad ermittelt werden. Er gibt den Anteil der unproduktiven Warteanteile wieder und stellt das Verhältnis von Durchlaufzeit zur Durchführungszeit dar.

$$\mathbf{FG_m = \frac{ZDL_m}{ZDF_m}} \quad (4.12)$$

mit	FG <sub>m</sub>	mittlerer Flußgrad
	ZDL <sub>m</sub>	mittlere Durchlaufzeit
	ZDF <sub>m</sub>	mittlere Durchführungszeit

Wie die Gleichung 4.12 zeigt, wär im Falle einer optimalen Fertigung der Flussgrad 1, was in der Praxis aber selten vorkommt. Ein hoher Flussgrad deutet somit auf Verluste (hohe Bestände) in der Fertigung hin.<sup>60</sup>

---

<sup>60</sup> (Lödding, 2005, S. 53)

## 4.2.2 Durchlaufdiagramm

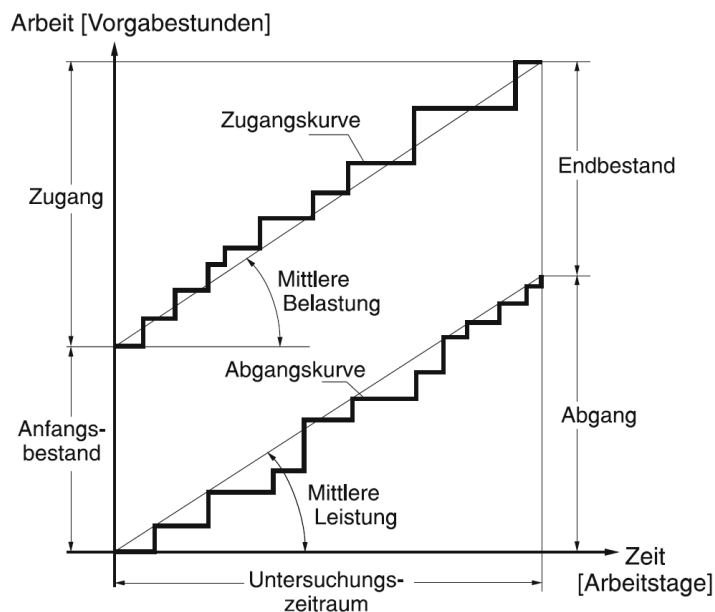


Abbildung 16: Durchlaufdiagramm<sup>61</sup>

Mithilfe des Trichtermodells lässt sich nun das Durchlaufdiagramm ableiten. Es werden dabei alle fertiggestellten Aufträge mit ihren Vorgabestunden kumulativ über die Zeit aufgetragen (Abgangskurve). Analog dazu wird die Zugangskurve mit den zugehenden Aufträgen erstellt.

Durch Idealisierung der Abgangs- und Zugangskurve durch eine Gerade lassen sich nun folgende grundlegende Kennzahlen aus dem Durchlaufdiagramm ableiten:<sup>62</sup>

### 4.2.2.1 Leistungskennzahlen:

Mithilfe des Durchlaufdiagramms lassen sich nun die sogenannten Leistungskennzahlen eines Arbeitssystems ermitteln. Die mittlere Leistung stellt das Verhältnis aus geleisteter Arbeit und der Länge des Bezugszeitraumes dar.

<sup>61</sup> (Bechte, 1984)

<sup>62</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 26 ff.)

$$L_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_i}{p} \quad (4.13)$$

mit	$L_m$	Mittlere Leistung [Std/ BKT]
	$ZAU_i$	Auftragszeit (in Vorgabestunden) je Arbeitsvorgang [Std]
	$n$	Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge
	$P$	Länge des Bezugszeitraumes [BKT]

Aus der mittleren Leistung lässt sich unmittelbar auf die mittlere Auslastung eines Arbeitssystems schließen. Die mittlere Auslastung stellt das Verhältnis von mittlerer Leistung zur maximal möglichen Leistung dar.

$$A_m = \frac{L_m}{L_{max}} \cdot 100 \quad (4.14)$$

mit	$A_m$	mittlere Auslastung [%]
	$L_m$	mittlere Leistung [Std/BKT]
	$L_{max}$	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

#### 4.2.2.2 Bestandskennzahlen:

Der Bestand stellt eine fundamentale Kennzahl des Durchlaufdiagramms dar und ergibt sich aus dem vertikalen Abstand der Zugangs- und Abgangskurve. Im Allgemeinen beschreibt sich der mittlere Bestand wie folgt:

$$B_m = \frac{\int_{T_0}^{T_1} ZU(T) dT - \int_{T_0}^{T_1} AB(T) dT}{T_1 - T_0} \quad (4.15)$$

mit	$B_m$	mittlerer Bestand (Vorgabestunden) [Std]
	$ZU(T)$	Zugang (kumulierter Arbeitsinhalt der zugehenden Arbeitsvorgänge über der Zeit) [Std]
	$AB(T)$	Abgang (kumulierter Arbeitsinhalt der abgehenden Arbeitsvorgänge über der Zeit) [Std]
	$T_0$	Beginn des Bezugszeitraumes
	$T_1$	Ende des Bezugszeitraumes

Zahlreiche Betriebsuntersuchungen haben jedoch gezeigt, dass es für die Rückmeldung eines Arbeitsvorganges reicht, diskrete Zeitabschnitte zugrundezule-

gen.<sup>63</sup> Meist erfolgt dann eine Rückmeldung am Ende einer Arbeitsschicht. Die Berechnung des mittleren Bestandes vereinfacht sich somit enorm und kann über die Summe der Einzelbestände pro Zeitabschnitt (z.B. pro Tag), dividiert durch die Anzahl der Zeitabschnitte die im Bezugszeitraum enthalten sind, berechnet werden.

$$B_m = \frac{\sum_{T=T_0}^{T_i} B(T)}{Z} \quad (4.16)$$

mit	$B_m$	mittlerer Bestand (Vorgabestunden) [Std]
	$B(T)$	Bestand im Zeitabschnitt T [Std]
	$Z$	Anzahl der Zeitabschnitte im Bezugszeitraum

Aus dem Verhältnis des mittleren Bestandes und der mittleren Leistung ergibt sich die mittlere Reichweite.

$$R_m = \frac{B_m}{L_m} \quad (4.17)$$

mit	$R_m$	mittlere Reichweite des Bestandes [BKT]
	$B_m$	mittlerer Bestand [Std]
	$L_m$	mittlere Leistung [Std/BKT]

#### 4.2.2.3 Terminabweichungskennzahlen

Werden zu den produktionstechnischen Rückmeldedaten Ist-Daten auch die Soll-daten erfasst, lässt sich auch die Terminabweichung<sup>64</sup> darstellen. Die Abgangsdifferenz wird zwischen dem Bearbeitungsende - Ist und Bearbeitungsende - Soll dargestellt.

$$TAA = TBE - TBE(s) \quad (4.18)$$

mit	TAA	Terminabweichung Abgang
	TBE	Termin Bearbeitungsende
	(s)	Sollwert einer Kenngröße

<sup>63</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 28)

<sup>64</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 23 ff.)

Ist die Differenz positiv, so wurde der Auftrag später wie geplant fertiggestellt worden. Selbiges gilt für den Zugang, welcher sich aus Bearbeitungsstart -Ist und Bearbeitungsstart - Soll ergibt.

$$\mathbf{TAZ = TBEV - TBEV(s)} \quad (4.19)$$

mit            TAZ            Terminabweichung Zugang  
                  TBEV          Termin Bearbeitungsende Vorgänger

Eine negative Differenz bedeutet hier, dass der Auftrag früher als geplant gestartet wurde. Aus der Differenz der beiden Terminabweichungskennzahlen bzw. gleichbedeutend die Differenz der Ist-Durchlaufzeit und Soll-Durchlaufzeit, ergibt sich die relative Terminabweichung. Mittels relativer Terminabweichung lässt sich denn erkennen, ob sich die Terminalsituation im Abgang gegenüber dem Zugang verbessert oder verschlechtert hat. Ein negativer Wert bedeutet eine verbesserte Durchlaufzeit als die geplante Durchlaufzeit.

$$\mathbf{TAR = TAA - TAZ = ZDL - ZDL(s)} \quad (4.20)$$

mit            TAR            Terminabweichung relativ  
                  ZDL            Durchlaufzeit

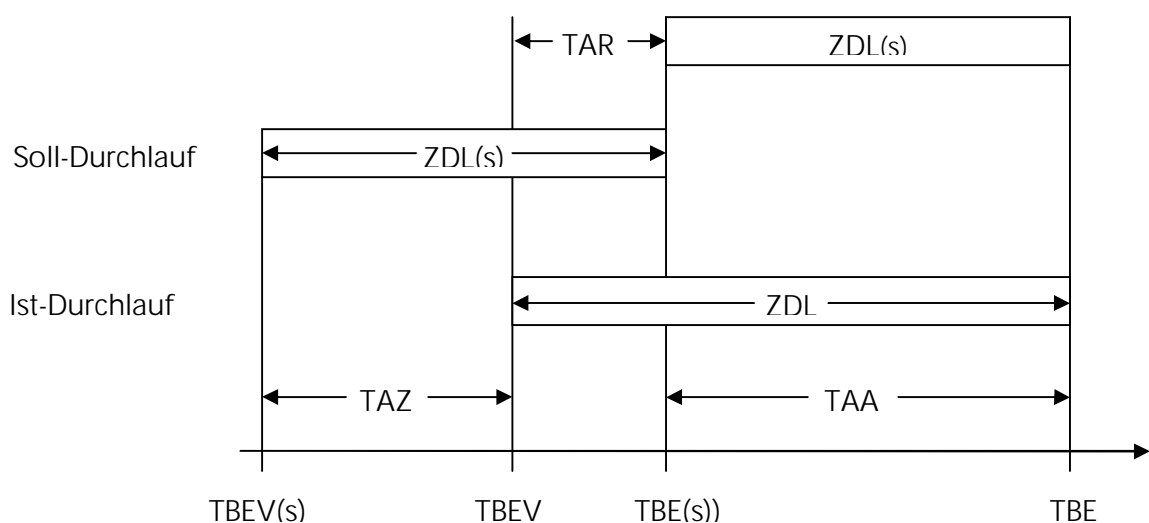


Abbildung 17: Darstellung Terminabweichung<sup>65</sup>

<sup>65</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 24)

In Abbildung 17 sind nun die verschiedenen Terminabweichungen dargestellt. Mit Hilfe der zuvor genannten Zusammenhänge können nun die einzelnen Zeitanteile berechnet und statistisch ausgewertet werden. Große Terminabweichungen können auf ungenaue Planungsdaten oder auf eine Überlastung im System hinweisen. Arbeitssysteme mit großen Terminabweichungen gilt es jedenfalls genauer zu untersuchen.



### 4.2.3 Produktionskennlinien

Die Produktionskennlinien sind graphische Darstellungen, welche den Zusammenhang zwischen zwei Variablen widerspiegeln. In der Produktionslogistik werden zunächst die fünf Größen: Termineinhaltung, Durchlaufzeit, Leistung, Bestand und Kosten als Zielgrößen definiert. Von jenen Variablen lassen sich aber nur drei (Bestand, Durchlaufzeit und Leistung) als unabhängige Einflussgrößen definieren.<sup>66</sup> Mit diesen drei Variablen lassen sich Abhängigkeiten definieren und somit den Zustand einer Produktion beschreiben und ermöglichen im Gegensatz zum Durchlaufdiagramm eine unmittelbare Aussage über das Bestandsniveau. Für die weiteren Ausführungen wird der Bestand als unabhängige Variable gewählt um die logistische Kennlinien Theorie weiter aufzubauen.

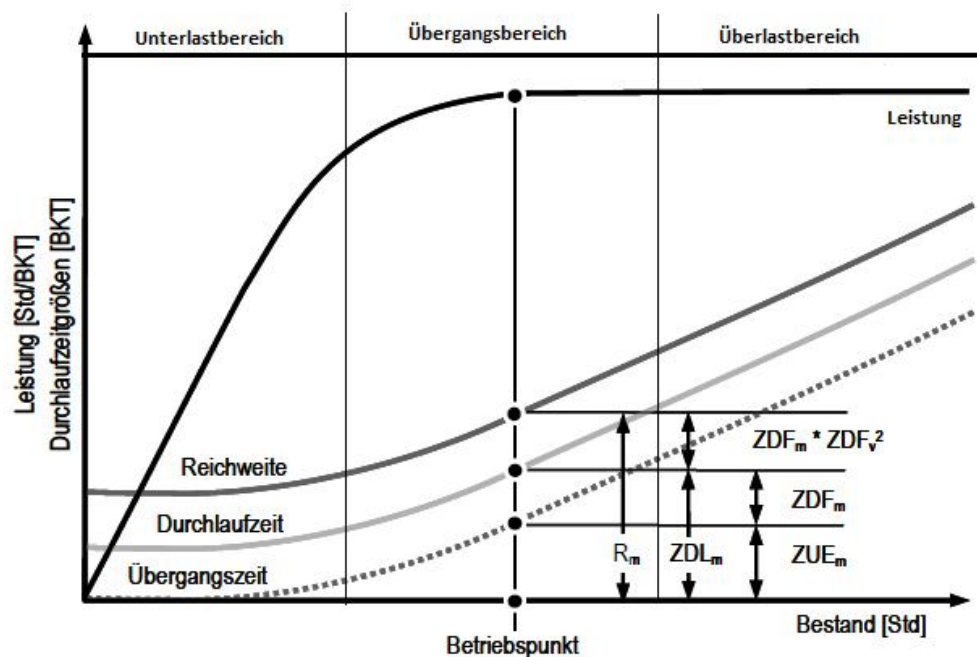


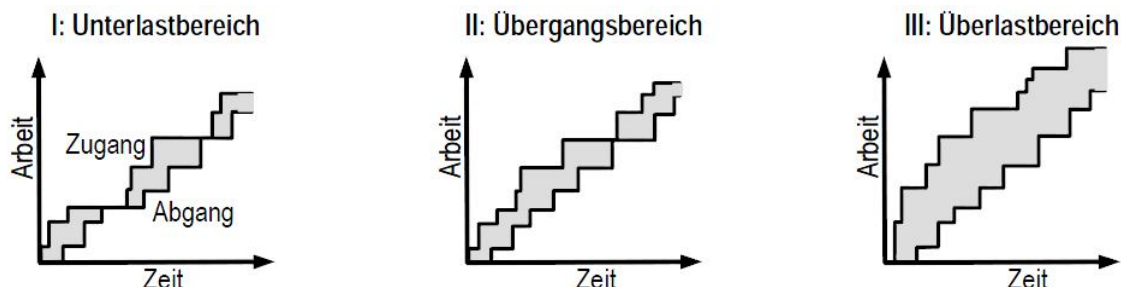
Abbildung 18: Graphische Darstellung von Produktionskennlinien<sup>67</sup>

Wie in Abbildung 18 ersichtlich ist, werden die Kennlinien in drei Betriebsbereiche (Unterlast-, Übergangs- und Überlastbereich) eingeteilt. Die drei Betriebszustände (Abb. 19) lassen sich aus dem Durchlaufdiagramm ableiten, und hängen vom Bestandsniveau ab. In obenstehender Abbildung sind nun die Kennlinien der Leistung, Reichweite, Durchlaufzeit, Übergangszeit und relative Terminabweichung über den Bestand und die drei Betriebsbereiche dargestellt.

<sup>66</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 12)

<sup>67</sup> (Lödding, 2005, S. 60)

Im Unterlastbereich können alle ankommenden Aufträge ohne Wartezeit abgearbeitet werden. Es kommt somit zu keiner Bestandsbildung am Arbeitssystem. Im Übergangsbereich kommt es durch die begrenzten Kapazitäten zum Konkurrieren um die Ressourcen und daraus resultierend zu einer Bestandspufferbildung.



**Abbildung 19: Betriebszustände aus dem Durchlaufdiagramm** <sup>68</sup>

Im Überlastbereich ist das Arbeitsvolumen stetig größer als das maximale Leistungsvolumen und es kommt somit zu keinen bestandsbedingten Materialflussabbrissen.<sup>69</sup>

Wie in Abbildung 19 nun ersichtlich ist, steigt die Leistungskennlinie im Unterlastbereich nun proportional zum Bestand an. Aus den vorherig genannten Gründen verflacht sich die Leistungskennlinie in den Übergangs- und Überlastbereichen und nähert sich dem Leistungsmaximum an. Die Reichweite (Gl. 4.17) hat im Unterlastbereich ein annäherndes konstantes Verhalten und kann ein bestimmtes Minimum nicht unterschreiten. In diesem Bereich entspricht die mittlere Reichweite somit gleich der Mindestreichweite, was aus den Durchführungszeiten der Aufträge resultiert.<sup>70</sup> Im Übergangs- und Überlastbereich steigt die Reichweitenkennlinie proportional zum Bestand an. Analog zu den Überlegungen der Reichweite, lassen sich die Durchlaufzeit- und Übergangszeitkennlinie definieren. Im Unterlastbereich sinkt die Durchlaufzeit auf ein Minimum (Durchführungszeit) ab, hingegen die Übergangszeit bei idealer Fertigung gegen Null geht. Im Übergangs- und Überlastbereich steigen beide Kennlinien proportional zum Bestandsniveau an. Alle Werte der Kennlinien stellen Mittelwerte dar und entsprechen einem diskreten Betriebspunkt der Produktion, bei veränderbarem Bestand und ansonsten gleichen Rahmenbedingungen.

<sup>68</sup> (Schuh, 2006, S. 477)

<sup>69</sup> (Schuh, 2006, S. 477)

<sup>70</sup> (Lödding, 2005, S. 60 f.)

### 4.2.3.1 Modellierung der Produktionskennlinien

Die ersten Produktionskennlinien wurden in den 80er Jahren mittels Computersimulation ermittelt.<sup>71</sup> Mit Hilfe eines deduktiv-experimentellen-Ansatzes entwickelte Nyhuis Näherungsgleichungen für die Kennlinien der Leistung, Auslastung und Reichweite.<sup>72</sup> Gemeinsam mit Ludwig entwickelte er die Kennlinien für Übergangs- und Durchlaufzeit.<sup>73</sup> Yu ergänzte die logistischen Kennlinien mit der relativen Terminabweichung und relativen Termintreue.<sup>74</sup> Im folgenden Abschnitt soll nun die Herleitung und Berechnung der Kennlinien beschrieben werden, um ein Grundverständnis für deren Wirkzusammenhänge zu erhalten.

#### Ideale Produktionskennlinie

Um die Kennlinien in analytischer Form aufbauen zu können, muss ein idealisierter Fertigungsablauf zu Grunde gelegt werden. Der ideale Fertigungsablauf charakterisiert sich folgendermaßen:<sup>75</sup>

- In jedem Arbeitssystem befindet sich zu jedem Zeitpunkt genau ein Auftrag.
- Die Abarbeitung eines Auftrags erfolgt unmittelbar nach seinem Eintreffen am Arbeitssystem, daraus resultiert dass die Übergangszeit zwischen zwei Arbeitsvorgängen Null beträgt und es zu keiner Bestandsbildung kommt.

Sind jene beiden Anforderungen erfüllt, müssen die Aufträge weder um die Kapazitäten konkurrieren (keine Wartezeiten), noch müssen die Arbeitssystem auf Aufträge warten (keine Leerzeiten). Für die Berechnung der idealen Prozesskennzahlen müssen weitere Annahmen getroffen werden:

- Betrachtung eines einzelnen Arbeitssystems.
- Maximale Leistung  $L_{\max}$  eines Arbeitssystems muss gegeben sein.
- Aufträge und Arbeitsinhalte sind gegeben und kurzfristig nicht änderbar
- Losweiser Transport keine überlappte Fertigung.
- Hinreichend genaue Planungsdaten für Auftragszeiten liegen vor.
- Angemessener Untersuchungszeitraum um repräsentative Daten zu erhalten.

---

<sup>71</sup> (Erdlenbruch, 1984), (Bechte, 1984)

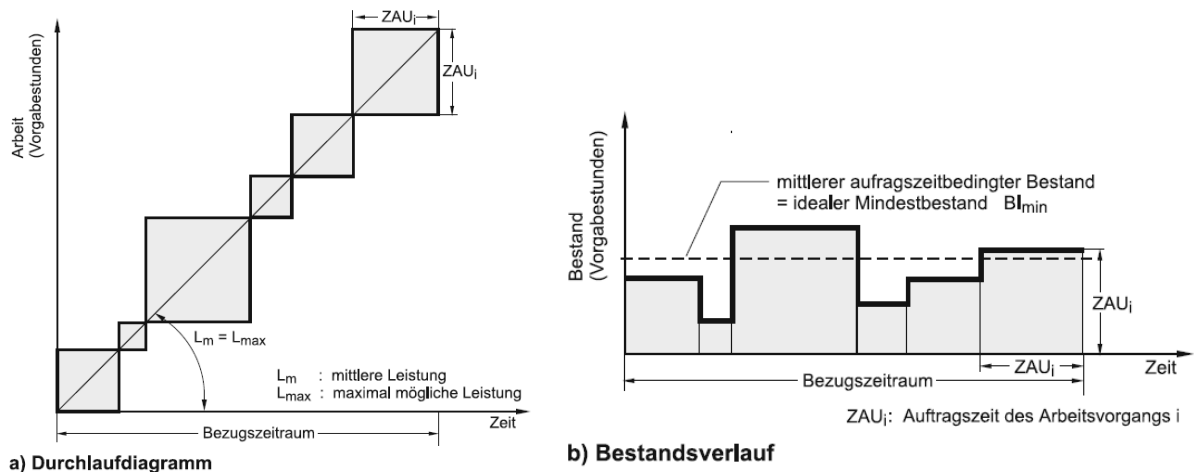
<sup>72</sup> (Nyhuis P. , 1991)

<sup>73</sup> (Ludwig & Nyhuis, 1992)

<sup>74</sup> (Yu, 2001)

<sup>75</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 67 f.)

Aufbauend auf den zuvor genannten Voraussetzungen kann nun der ideale Mindestbestand, welcher Ausgangspunkt zur Modellierung der idealen Kennlinien darstellt, formuliert werden.



**Abbildung 20: Durchlaufdiagramm beim idealen Fertigungsprozess<sup>76</sup>**

Ausgehend von einem idealisierten Durchlaufdiagramm (Abb.20) lässt sich nun der ideale Mindestbestand ableiten. Die einzelnen Durchlaufelemente (Aufträge) bestehen nur aus den Auftragszeiten da die Übergangszeiten gegen Null gehen. Die Durchlaufelemente stellen somit bei gleicher Skalierung der Achsen Quadrate im Durchlaufdiagramm dar. Der ideale Mindestbestand ergibt sich somit aus der Summe der gebildeten Flächen der einzelnen Auftragszeiten, dividiert durch die Einzelwerte der Auftragszeiten, welche am Arbeitssystem abzuarbeiten sind.

$$BI_{min} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZAU_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} = ZAU_m + \frac{ZAU_s^2}{ZAU_m} = ZAU_m * (1 + ZAU_v^2) \quad (4.21)$$

mit	$BI_{min}$	Idealer Mindestbestand [Std]
	$ZAU_i$	Auftragszeit je Arbeitsvorgang [Std]
	$n$	Anzahl der Arbeitsvorgänge
	$ZAU_m$	mittlere Auftragszeit
	$ZAU_s$	Standardabweichung der Auftragszeit
	$ZAU_v$	Variationskoeffizient der Auftragszeit

<sup>76</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 63)

In Formel 4.21 wird davon ausgegangen, dass die Übergangszeiten wie z.B. für Transport vernachlässigbar sind, ist dies jedoch nicht der Fall, erweitert sich die Formel des idealen Mindestbestandes zu:

$$BI_{min} = ZAU_m + \frac{ZAU_s^2}{ZAU_m} + ZUE_{min} \quad (4.22)$$

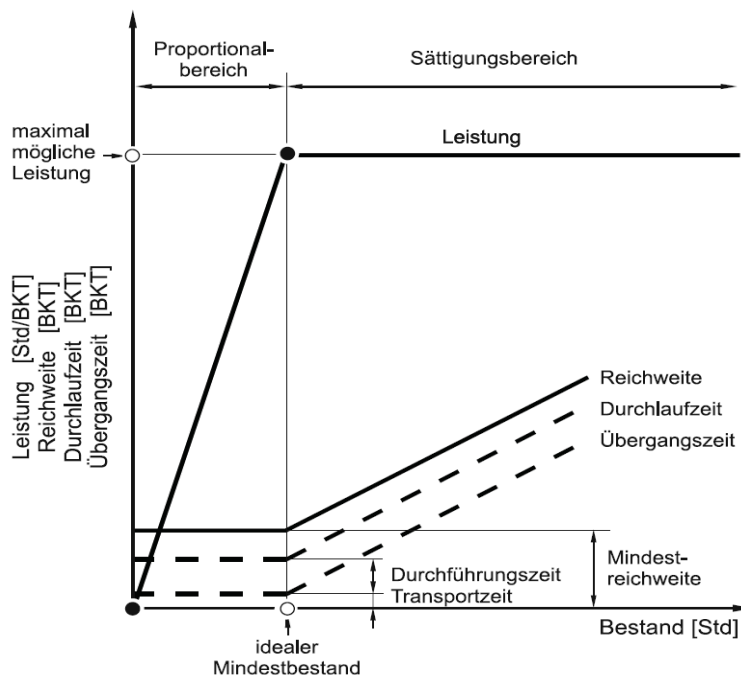
mit  $BI_{min}$  idealer Mindestbestand [Std]  
 $ZAU_m$  mittlere Auftragszeit [Std]  
 $ZAU_v$  Variationskoeffizient der Auftragszeit  
 $ZUE_{min}$  Mindestübergangszeit

Besteht ein Arbeitssystem aus mehreren Arbeitsplätzen, werden die idealen Mindestbestände einfach addiert.

$$BI_{min} = \sum_{i=1}^{AAP} BI_{min,i} \quad (4.23)$$

mit  $BI_{min}$  idealer Mindestbestand [Std]  
 $BI_{min,i}$  idealer Mindestbestand des Einzelarbeitssystems  $i$  [Std]  
 AAP Anzahl Arbeitsplätze

Die Herleitung des idealen Mindestbestandes basieren unter der Restriktion, dass die maximal mögliche Leistung gegeben sein muss. Jene ergibt sich meist aus der zur Verfügung stehenden Kapazität (Personal, Betriebsmittel...). Mithilfe der theoretischen Grundlagen des idealen Mindestbestandes, lassen sich nun die idealen Produktionskennlinien (Abb. 21) ableiten. Im Betriebspunkt des idealen Mindestbestandes erreicht das Arbeitssystem die maximale Leistungsmöglichkeit und es ist somit keine Leistungssteigerung durch Bestandserhöhung mehr möglich, es liegt völlige Systemauslastung vor (Sättigungsbereich). Wird der Bestand hingegen verringert nimmt die Leistung proportional zum Bestand ab (Proportionalbereich). Die ideale Reichweitenkennlinie verläuft bis zum idealen Mindestbestand parallel zur Bestandsachse und steigt danach im Verhältnis von Bestand zu Leistung (vgl. Formel 4.17) an.



**Abbildung 21: ideale Produktionskennlinien<sup>77</sup>**

Die weiteren Kennlinien wie Durchlaufzeit und Übergangszeit werden parallel zur Reichweite eingezeichnet, dies ist aber nur zulässig, wenn die Abarbeitungsreihenfolgen unabhängig vom Arbeitsinhalt der Aufträge sind.<sup>78</sup>

### **Näherungsgleichung zur Berechnung realer Produktionskennlinien**

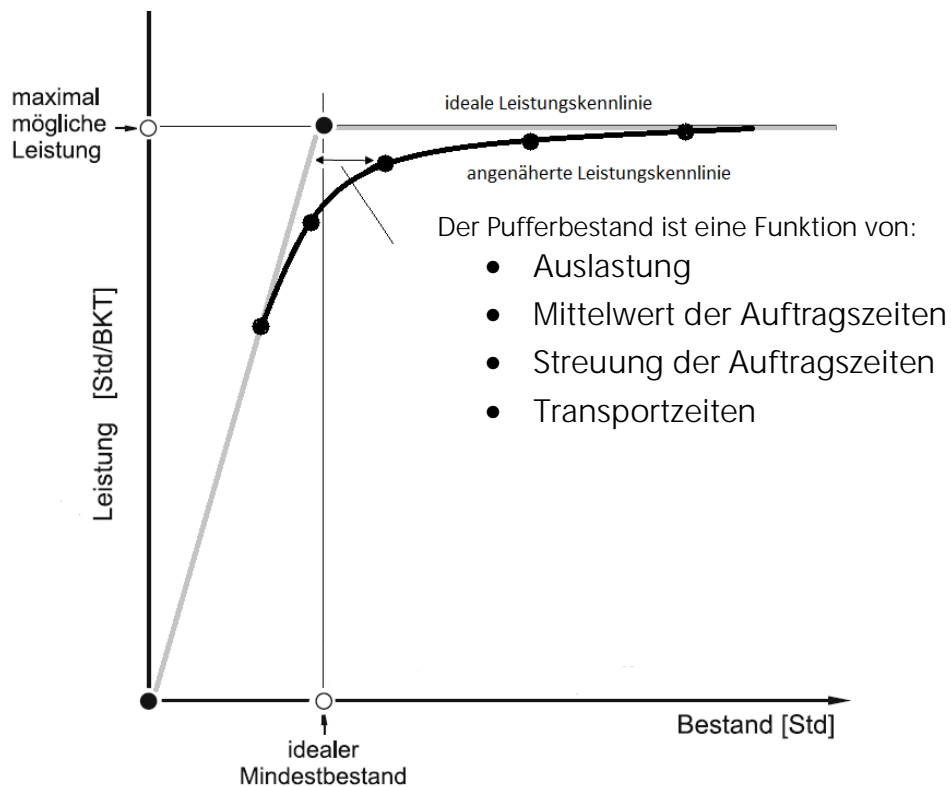
In der Praxis kann eine idealisierte Kennlinie natürlich nicht direkt übernommen werden, da es eine Reihe an Einflussfaktoren gibt, welche die reale von der idealen Kennlinie unterscheiden. Durch die Streuung der Auftragszeiten und abweichende Planvorgaben von der Produktion kommt es zu Abweichungen der realen Betriebspunkte von den idealen Betriebspunkten. Es ist somit zum Bearbeitungsbestand ein Pufferbestand erforderlich (Abb. 21), um die Auslastung der Arbeitssysteme zu sichern. Nyhuis hat daher eine Näherungsgleichung auf Basis der C-Norm-Funktion entwickelt um die reale Leistungskennlinie anzunähern. Auf die genaue Herleitung wird hier aber verzichtet, es wird auf die vorhandene Fachliteratur<sup>79</sup> verwiesen. Bei sehr hohen und niedrigen Beständen stimmt die reale mit der idealen Kennlinie überein, im Übergangsbereich von Proportional- zu Sätti-

<sup>77</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 68)

<sup>78</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 69)

<sup>79</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 71-87)

gungsbereich kommt es aber zu größeren Abweichungen von der idealen Kennlinie (Abb. 21).



**Abbildung 22: Idealer versus angenäherter Leistungskennlinie<sup>80</sup>**

Diese Näherungsgleichungen sind zwar nicht exakt, bilden die Realprozesse aber hinreichend genau ab und werden in der Industrie sehr erfolgreich angewendet und sollen nun dargestellt werden, um das Potential der Fertigung mit seinen Arbeitssystemen analysieren zu können.

Die Näherungsgleichungen werden als Parameterfunktion dargestellt und können in Abhängigkeit des Parameters  $t$  berechnet werden. Ausgangspunkt der weiteren Berechnung stellt der ideale Mindestbestand (vgl. Formel 4.15) und die maximale Leistung, welche vorgegeben werden muss, dar. Aus Ableitung der C-Norm-Funktion lässt sich nun die mittlere Leistung wie folgt darstellen.

<sup>80</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 70)

$$L_m(t) = L_{max} \cdot (1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4) \quad (4.24)$$

mit	$L_m(t)$	mittlere Leistung [Std/BKT]
	$L_{max}$	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
	$t$	Laufvariable ( $0 \leq t \leq 1$ )

Die mittlere Auslastung folgt somit aus dem Verhältnis von mittlerer zur maximalen Leistung (vgl. Formel 4.10).

$$A_m(t) = \frac{L_m(t)}{L_{max}} \cdot 100 = (1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4) \cdot 100 \quad (4.25)$$

mit	$A_m(t)$	mittlere bestandsabhängige Auslastung [%]
	$L_m(t)$	mittlere Leistung [Std/BKT]
	$L_{max}$	maximale Leistung [Std/BKT]

Der mittlere Bestand der aus Bestandsabhängiger-und Pufferbestand besteht lässt sich wie folgt darstellen.

$$B_m(t) = B_B(t) + B_P(t) = BI_{min} \cdot (1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4) + BI_{min} \cdot \alpha_1 \cdot t \quad (4.26)$$

mit	$B_m(t)$	mittlerer Bestand (als Funktion von $t$ ) [Std]
	$B_B(t)$	mittlerer Bestand bei Auftragsbearbeitung [Std]
	$B_P(t)$	mittlerer Pufferbestand [Std]
	$BI_{min}$	idealer Mindestbestand [Std]
	$\alpha_1$	Streckfaktor

Der Streckfaktor  $\alpha_1$  gibt an wie weit die Kurve nach rechts gestreckt wird, dieser kann aber nur empirisch ermittelt werden, für Werkstättenfertigung hat sich ein Streckfaktor von  $\alpha_1=10$  aber bewährt.<sup>81</sup>

---

<sup>81</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 79ff u. 100f)



Die Kennlinienwerte für die Zeitgrößen (Reichweite, Durchlaufzeit und Übergangszeit) lassen sich ebenso über die Transformation der C-Norm-Funktion darstellen. Die mittlere Reichweite ergibt sich somit aus mittlerem Bestand zu mittlerer Leistung (vgl. Formel 4.13).

$$\mathbf{R}_m(t) = \frac{\mathbf{B}_m(t)}{\mathbf{L}_m(t)} \quad (4.27)$$

mit	$R_m(t)$	mittlere Reichweite [BKT]
	$B_m(t)$	mittlerer Bestand (als Funktion von t) [Std]
	$L_m(t)$	mittlere Leistung [Std/BKT]

Mithilfe der mittleren Reichweite lässt sich nun die mittlere Durchlaufzeit definieren.

$$\mathbf{ZDL}_m(t) = \mathbf{R}_m(t) - \mathbf{ZDF}_m \cdot \mathbf{ZDF}_v^2 \quad (4.28)$$

mit	$ZDL_m(t)$	mittlere Durchlaufzeit [BKT]
	$R_m(t)$	mittlerer Reichweite [BKT]
	$ZDF_m$	mittlerer Durchführungszeit [BKT]
	$ZDF_v$	Variationskoeffizient der Durchführungszeit

Aus der mittleren Durchlaufzeit lässt sich wiederum die mittlere Übergangszeit berechnen (vgl. Formel 4.7).

$$\mathbf{ZUE}_m(t) = \mathbf{ZDL}_m(t) - \mathbf{ZDF}_m \quad (4.29)$$

mit	$ZUE_m(t)$	mittlere Übergangszeit [BKT]
	$ZDL_m(t)$	mittlerer Durchlaufzeit [BKT]
	$ZDF_m$	mittlere Durchführungszeit [BKT]

Mithilfe der Formeln 4.24 - 4.29 lassen sich nun die Kennlinien (Leistung, Reichweite, Durchlaufzeit und Übergangszeit) modellieren.

## 5 Logistische Potentialanalyse

In folgendem Abschnitt, soll nun eine systematische Vorgehensweise erarbeitet werden, um ein grundlegendes Systemverständnis zu erhalten und logistische Potentiale der eigenen Produktion zu erkennen. Die in den vorherigen Kapiteln besprochene Theorie soll nun ihre systematische Anwendung an einem praktischen Beispiel finden. Durch die Komplexität und Variantenvielfalt der heutigen Produktionsprozesse ist es für Firmen oftmals sehr schwierig Engpasssysteme zu identifizieren. Vor allem das Erkennen von sogenannten dynamischen Engpasssystemen bereitet immer wieder Schwierigkeiten. Bei dynamischen Engpasssystemen kommt es nur zu einer zeitlich begrenzten Unterdeckung von Betriebsressourcen (vgl. Abschnitt 5.5). Das Herausfiltern jener Arbeitssysteme ist aber Voraussetzung um vorzeitig geeignete Maßnahmen ergreifen zu können. Mithilfe der logistischen Engpassanalyse soll zunächst der Betriebszustand über den Untersuchungszeitraum dargestellt werden.

Aufbauend auf den vorliegenden Produktionsdaten wird dann eine Methode zur Planung des zukünftigen Produktionsprogrammes erarbeitet, um statische sowie dynamische Engpasssysteme vorzeitig identifizieren zu können. Es können somit reale Produktionsprogramme abgebildet werden und es muss keine Mittelwertbetrachtung vorgenommen werden. Streuungsfehler werden somit ausgeschlossen, was zu einer größeren Ergebnisvalidität führt. Es wird hier ausdrücklich darauf hingewiesen, eine Methode zu entwickeln um zukünftige Produktionsprogramme mit einfachen Tabellenkalkulationsprogrammen abbilden zu können. Mit kurzen Kommentaren sollen das Analysepotential der verschiedenen Methoden vervollständigt werden. Anschließend wird ein Lösungskatalog angeboten, welche Maßnahmen es zur Beseitigung von dynamischen Engpässen gibt.

Zur Visualisierung der Vorgehensweise wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Austria Research GmbH (Bereich Produktions- und Logistikmanagement) ein aktuelles Fallbeispiel analysiert, um die praxisgerechte Anwendung gewährleisten zu können. Zwecks Verschwiegenheit, wurden alle Daten anonymisiert um auf kein Unternehmen Rückschlüsse ziehen zu können.

## 5.1 Zielsetzung der Analyse

Dabei geht es um die genaue Definition der Unternehmensziele gemäß Punkt 1.3. In unserem Fall ist es immer wieder zu Abweichungen vom zugesagten Liefertermin gekommen, was zur Verringerung der Kundenzufriedenheit führte, vorrangiges Ziel war es die Liefertreue bei möglichst geringen Beständen zu steigern. Durch die logistische Engpassanalyse sollen kritische Durchlaufsysteme identifiziert und Potentiale der einzelnen Arbeitssysteme aufgezeigt werden. Es soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass nicht alle Arbeitssysteme, sondern lediglich die wichtigsten Engpassarbeitssysteme, genauer dargestellt werden.

## 5.2 Datenerfassung

In unserem Untersuchungszeitraum wurden 18194 Aufträge mit 65932 Arbeitsvorgängen erfasst und ausgewertet. Für die Datenauswertung standen uns folgende Arbeitssystemdaten über den Untersuchungszeitraum von 6 Monaten zur Verfügung:

- Auftragsnummer
- Arbeitsvorgangsnummer
- Arbeitssystemnummer
- Vorgangsrüstzeit
- Vorgangsbearbeitungszeit
- Gesamtbearbeitungszeit
- Starttermin, Soll
- Endtermin, Soll
- Starttermin, Ist
- Ende, Ist

Angemerkt sei an dieser Stelle, dass alle Analysen nur auf diesen zur Verfügung gestellten Arbeitssystemdaten vorgenommen wurden.

Teil der Datenerfassung ist es auch das Unternehmen in die steuerungsrelevanten Fertigungsmerkmalen vgl. Punkt 2.2 zu klassifizieren. In unten dargestellter Tabelle ist unser Unternehmen wie folgt einzuordnen:

Kriterium	Ausprägungen				
	Werkbank- prinzip	Baustellen- prinzip	Werkstätten- prinzip	Insel- fertigung	Fließfer- tigung
Fertigungs- prinzip					
Fertigungsart	Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserien- fertigung		Serien- fertigung	Massenferti- gung
Teilefluss	Chargenferti- gung	Losweiser Transport		Überlappte Fertigung	One-piece- fow
Variantenan- zahl	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Materialfluss- komplexität	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Schwankun- gen des Ka- pazitätsbedar- fs	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Kapazitäts- flexibilität	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Belastungs- flexibilität	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch

**Tabelle 2: Einordnung gemäß steuerungsrelevanter Kriterien**

Unser Unternehmen produziert vorwiegend Einzel- und Kleinserien im Werkstättenprinzip.

Bei Kleinteilen wurde der Teilefluss im Los organisiert, zum Teil handelt es sich aber um sehr große Bauteile und es ist nur ein stückweiser Transport möglich.

Aus der recht hohen Variantenzahl resultiert ein relativ komplexer Materialfluss.

Zu den letzten drei Punkten der Matrix konnte keine konkrete Aussage getroffen werden, da jene arbeitssystemspezifisch unterschiedlich betrachtet werden mussten.

## 5.3 Lokalisierung der Engpassysteme

Das Unternehmen hatte 64 Arbeitsstationen welche einer genauen Analyse unterzogen wurden. Ausgangspunkt der genauen Analyse war, dass das Unternehmen nicht genau wusste wo die Engpassysteme vorliegen. Um vorerst die statischen Engpassysteme zu ermitteln, wurden die gesamten Produktionsdaten über einen Zeitraum von 6 Monaten (1.1.2010-30.6.2010) einer Bestandsanalyse unterzogen.

### 5.3.1 Bestandsberechnung

Um eine systematische Vorgehensweise zu definieren muss im ersten Schritt eine Bestandsanalyse durchgeführt werden. Um festzustellen an welchen Arbeitssystemen es zu hohen Bestandsbildungen kommt, wurden zuerst die tagaktuellen Bestände der einzelnen Anlagen errechnet. Der Bestand [min.] der einzelnen Arbeitsstationen berechnet sich aus den schon im System befindlichen Aufträge und der Differenz von Zugang zu Abgang vgl. Abbildung 14. Zur Illustration sind in untenstehender Tabelle Arbeitssysteme mit deren Bestandsanhäufungen, über die Tage exemplarisch, dargestellt. Zu Beachten gilt hier, dass der Bestand in Minuten dargestellt ist welcher abzuarbeiten ist.

Datum	1966 Bestand [min]	1967 Bestand [min]	1968 Bestand [min]	1969 Bestand [min]	8043 Bestand [min]	998 Bestand [min]	8054 Bestand [min]
05.01.10	26007,00	30760,00	12318,00	393,00	5978,59	0,00	8588,84
06.01.10	26007,00	30760,00	12318,00	393,00	5978,59	0,00	8588,84
07.01.10	26816,50	30760,00	8614,90	1257,00	5920,60	0,00	8941,26
08.01.10	28106,50	30760,00	8839,90	2091,00	5659,31	0,00	9628,06
09.01.10	28106,50	30760,00	8839,90	2091,00	5808,31	0,00	9628,06
10.01.10	28106,50	30760,00	8839,90	2091,00	5938,71	0,00	9349,67
11.01.10	26320,00	29538,00	10658,40	3453,00	5833,84	0,00	9649,02
12.01.10	25050,00	29735,00	11011,24	3401,00	6241,46	38,00	10173,51
13.01.10	24836,00	29735,00	13605,81	2301,00	5267,17	0,00	10668,11
14.01.10	1760,45	29735,00	9970,31	6115,00	5436,89	0,00	11785,86
15.01.10	1642,45	29538,00	9694,31	6115,00	6201,64	0,00	12426,74
16.01.10	1699,45	29538,00	9694,31	6221,00	5659,60	0,00	12026,74
.....							
26.06.10	15577,85	12098,75	11815,40	4978,00	5694,82	153,50	3935,92
27.06.10	15577,85	12098,75	11815,40	4978,00	5694,82	153,50	3935,92
28.06.10	6615,85	14944,75	10949,40	4202,00	5095,64	153,50	3466,57
29.06.10	7085,85	15110,75	12390,40	3468,00	4833,81	600,76	3427,71
30.06.10	7085,85	13288,75	9465,40	2915,00	7264,00	600,76	4284,29

Tabelle 3: Bestandsdarstellung

Wie in Tab. 3 nun ersichtlich ist, beträgt der Bestand zum Stichtag 5.1.2010 Start der Untersuchung in Arbeitssystem 1967 beispielsweise 30760 Minuten. Der hohe Bestand kommt dadurch zustande, dass mehrere Anlagen zu einem Arbeitssystem zusammengefasst sind. Der weitere Bestandsverlauf über den Untersuchungszeitraum ist ebenso ersichtlich. Aufgrund des Bestandsverlaufes kann nun aber noch keine Aussage über eventuelle Engpässe getroffen werden. Der Bestand kann z.B. stetig hoch sein, besteht eine Arbeitssystem jedoch aus mehreren Kapazitäten, ist die Ausbringungsmenge ebenfalls immer hoch, was ein gewisses Bestandsniveau voraussetzt um auslastungsbedingte Verluste zu vermeiden. Es können genauso Arbeitssysteme mit weniger Bestandsanhäufung Engpasssysteme darstellen. Es bedarf also noch weitere Analysen, um auf Basis der Produktionsdaten Engpasssysteme identifizieren zu können.

### **5.3.2 Berechnung des Variationskoeffizient der Auslastung (VAKO<sub>A</sub>)**

Um nun einen mathematischen Zusammenhang zwischen Auslastung und Ausbringung herzustellen, wird der sogenannte Variationskoeffizient der Ausbringungsmenge berechnet. Zunächst wird die mittlere Leistung eines Arbeitssystems gemäß Formel 4.16 und die Standardabweichung gemäß Formel 4.8 berechnet. Der VAKO stellt die Standardabweichung zur mittleren Leistung ins Verhältnis vgl. Formel 4.9. Der Variationskoeffizient gibt somit wieder, wie stark die Standardabweichung von der mittleren Leistung abweicht und stellt eine Art Normierung dar, um die verschiedenen Anlagen miteinander vergleichen zu können. Jene Kennzahl gibt somit Aufschluss über den Betriebszustand und widerspiegelt ob eine Anlage regelmäßig oder nur sporadisch ausgelastet ist.

Datum	1007		1967		1968		8054	
	Ausbr. [min]	Bestand [min]	Ausbr [min].	Bestand [min]	Ausbr. [min]	Bestand [min]	Ausbr. [min]	Bestand [min]
10.02.2010	1017,4	1056,3	0,0	<b>26808,0</b>	621,0	24655,5	1127,5	7213,6
11.02.2010	1241,0	1056,3	0,0	26808,0	2555,0	24125,5	990,5	7465,3
12.02.2010	0,0	1056,3	0,0	26808,0	2130,7	23704,8	1440,7	7524,6
13.02.2010		1056,3					618,2	6906,4
14.02.2010		1056,3						
15.02.2010	0,0	1200,0	0,0	26808,0	2588,0	22178,8	568,5	6614,9
16.02.2010	0,0	1200,0	0,0	26808,0	900,0	23218,8	1740,1	7598,0
17.02.2010	0,0	1200,0	0,0	26808,0	7942,0	15499,8	721,7	7196,4
18.02.2010	0,0	1200,0	0,0	26808,0	1279,0	19384,3	900,5	6690,5
19.02.2010	0,0	2383,3	0,0	26808,0	4184,5	18826,8	1092,6	5891,4
20.02.2010		2383,3					1398,8	4527,0
21.02.2010		2383,3					187,4	4339,6
22.02.2010	0,0	2521,7	0,0	26808,0	6721,0	13288,6	1221,6	3657,1
23.02.2010	2339,4	1504,3	0,0	26808,0	1121,5	12603,8	734,0	3889,6
24.02.2010	0,0	1810,3	6644,0	20164,0	1734,0	13401,8	883,8	3311,3
25.02.2010	0,0	1810,3	0,0	29344,0	632,0	13493,8	1118,1	2926,3
26.02.2010	0,0	1810,3	3322,0	35988,0	2612,0	17235,2	763,3	2532,2
27.02.2010		1874,9					598,3	2053,2
28.02.2010		1874,9						
01.03.2010	113,6	1901,6	0,0	35988,0	1290,6	18978,6	606,7	2838,6
02.03.2010	0,0	1901,6	1672,0	34316,0	925,0	18631,6	832,0	3686,1
03.03.2010	349,7	1551,9	0,0	34316,0	3145,0	22617,6	934,0	3624,2
04.03.2010	0,0	1593,2	5016,0	34316,0	555,0	24723,6	2653,8	3787,3
05.03.2010	797,1	1809,9	0,0	34316,0	5832,0	26884,8	1475,8	3836,0
06.03.2010		1809,9					297,8	3562,9
07.03.2010		1809,9						
22.06.2010	0,0	1017,4	0,0	21054,8	2025,0	11759,0	1001,3	5128,5
23.06.2010	0,0	1017,4	21044,0	14170,8	2978,0	13581,4	1304,3	4359,1
24.06.2010	1595,6	1017,4	3672,0	12098,8	1759,0	12118,4	1202,5	4238,7
25.06.2010	0,0	1069,2	0,0	12098,8	512,0	11815,4	646,5	4156,0
26.06.2010		1069,2					220,1	
27.06.2010		1069,2						
28.06.2010	1017,4	113,0	0,0	14944,8	3424,0	10949,4	1264,4	3466,6
29.06.2010	0,0	113,0	0,0	15110,8	1559,0	12390,4	992,3	3427,7
30.06.2010	0,0	113,0	9210,0	13288,8	2966,0	9465,4	1057,0	4284,3
Ø Tagesaus.	360,4		2840,5	29889,4	2417,7	20639,1	1092,2	7394,3
Standardabw	576,08		9979,21		2323,70		443,22	
VAKO	1,60		3,51		0,96		0,41	

Tabelle 4: Berechnungsgrundlage für VAKO<sub>A</sub>

In unserem Fallbeispiel wurde der  $VAKO_A$  für alle Anlagen berechnet und ausgewertet, wobei es erwähnt ist, weicht der  $VAKO \pm 0,5$  von 1 ab, müssen jene Anlagen genauer bezüglich Auslastungsverhalten untersucht werden. Ist eine Anlage unregelmäßig ausgelastet spiegelt sich dies im  $VAKO_A$  wider. Dies ist für das weitere Vorgehen für die spätere Reichweitenberechnung von äußerst großer Relevanz.

Wie bei Anlage 1007 nun ersichtlich ist, liegt ein stetig hoher Bestand vor, es könnte nun davon ausgegangen werden, dass es sich hier um ein Engpasssystem handelt. Wertet man den  $VAKO_A$  aus, ergibt sich ein Wert von 1,6. Bei genauerer Analyse ist ersichtlich, dass das erwähnte Arbeitssystem nur sehr unregelmäßig belastet ist und somit eigentlich kein Engpasssystem darstellt. Dies bestätigt die Reichweitenberechnung, welche aber erst im nächsten Schritt erklärt wird ebenso. Bei Anlage 1967 ergibt sich ein  $VAKO$  von 3,51 was auf eine sehr unregelmäßige Ausbringung schließen lässt. Bei genauer Betrachtung dieses Arbeitssystems gibt es auch hier Tage wo keine Ausbringung zu verzeichnen ist. Wie in Tabelle 4 jedoch ersichtlich ist, steigt die Ausbringung an manchen Tagen bis zu ca. 47000 Minuten an. Bei diesem Arbeitsplatz handelt es sich um eine Schweißstation wo gesamte Baugruppen zusammen geschweißt werden und erst bei Fertigstellung des gesamten Auftrages die gesamte Arbeitszeit zurückgemeldet wird. Hier kann also schon davon ausgegangen werden, dass das Arbeitssystem ständig belastet wird.

In Tab. 4 sind nur vier Anlagen exemplarische dargestellt und es wurden auch nur zwei näher beschrieben um die Vorgehensweise der  $VAKO_A$ - Berechnung zu veranschaulichen.

Abschließend gilt es beim  $VAKO_A$  zu erwähnen, dass jener eine gute mathematische Möglichkeit ist, um eine Tendenz des Auslastungsverhaltens wiederzugeben. Es soll hier aber erwähnt werden, dass eine hohe Abweichung von eins nicht gleich auf eine geringe Auslastung geschlossen werden darf.

### **5.3.3 Reichweitenberechnung**

Um ein Engpasssystem eindeutig identifizieren zu können, muss im nächsten Schritt die mittlere Leistung mit dem Bestand in Verbindung gebracht werden. Dies erfolgt über die Berechnung der Reichweite (RW) gemäß Formel 4.17. Jene



Arbeitssysteme mit der höchsten Reichweite stellen im Produktionsablauf einen Engpass dar. Diese Erkenntnis wurde auch im Zuge mehrerer Untersuchungen bei verschiedenen Unternehmungen der Fraunhofer Research GmbH bestätigt. Es wurde nun die Reichweite aller Anlagen berechnet um jene Arbeitssystem mit der höchsten Reichweite zu ermitteln. Jene Arbeitssysteme sind dann als erstes genauer zu analysieren um korrektive Maßnahmen vorzunehmen. Nach Berechnung der Reichweite aller im Produktionsablauf befindlichen Anlagen sind hier jene Arbeitssysteme dargestellt, welche über die höchste mittlere Reichweite verfügen.

Datum	1967			1968			7750			8054			8051			1007		
	Ausbr. [min]	Bestand [min]	RW [BKT]	Ausbr. [min]	Bestand [min]	RW [BKT]	Ausbr. [min]	Bestand [min]	RW [BKT]	Ausbr. [min]	Bestand [min]	RW [BKT]	Ausbr. [min]	Bestand [min]	RW [BKT]	Ausbr. [min]	Bestand [min]	RW [BKT]
1.2.10	1970,0	29508,0	10,4	639,0	29508,0	10,3	1250,4	29508,0	6,7	1504,3	29508,0	7,2	764,4	29508,0	6,5	922,5	29508,0	2,8
2.2.10	10800,0	26808,0	9,4	756,0	26765,8	11,1	407,0	9976,5	6,5	1231,1	7539,2	6,9	794,8	5918,1	7,4	0,0	1174,67	3,1
3.2.10	0,0	26808,0	9,4	151,0	27360,8	11,3	185,5	9975,5	6,5	907,8	7960,6	7,3	512,1	5963,0	7,4	0,0	2192,11	5,8
4.2.10	0,0	26808,0	9,4	176,0	27482,8	11,4	239,0	10019,2	6,6	702,1	8378,1	7,7	1054,0	5557,7	6,9	472,3	2073,80	5,5
5.2.10	0,0	26808,0	9,4	888,0	24547,3	10,2	557,0	10198,2	6,7	911,1	7960,4	7,3	858,6	5302,7	6,6	0,0	2073,80	5,5
6.2.10	0,0	26808,0	9,4	705,8	24489,5	10,1	3450,5	14635,3	9,6	1208,3	7323,1	6,7	751,3	5833,8	7,3	0,0	2073,80	5,5
9.2.10	0,0	26808,0	9,4	966,0	24367,5	10,1	1040,8	14494,5	9,5	698,2	7693,1	7,0	320,8	5600,6	7,0	0,0	2073,80	5,5
10.2.10	0,0	26808,0	9,4	621,0	24655,5	10,2	1408,0	14777,3	9,7	1127,5	7213,6	6,6	1730,2	4929,4	6,1	1017,4	1056,36	2,8
11.2.10	0,0	26808,0	9,4	2555,0	24125,5	10,0	724,6	14481,5	9,5	990,5	7465,3	6,8	674,4	5112,3	6,4	1241,0	1056,36	2,8
12.2.10	0,0	26808,0	9,4	2130,7	23704,8	9,8	700,0	14481,5	9,5	1440,7	7524,6	6,9	692,9	5188,8	6,5	0,0	1056,36	2,8
13.2.10	0,0	26808,0	9,4	2588,0	22178,8	9,2	105,0	14561,5	9,5	568,5	6614,9	6,1	726,7	4989,1	6,2	0,0	1200,00	3,2
16.2.10	0,0	26808,0	9,4	900,0	23218,8	9,6	2683,0	14620,2	9,6	1740,1	7598,0	7,0	908,7	4658,5	5,8	0,0	1200,00	3,2
17.2.10	0,0	26808,0	9,4	7942,0	15499,8	6,4	2217,1	14640,8	9,6	721,7	7196,4	6,6	1356,6	3354,4	4,2	0,0	1200,00	3,2
18.2.10	0,0	26808,0	9,4	1279,0	19384,3	8,0	239,2	14712,8	9,6	900,5	6690,5	6,1	517,0	3271,3	4,1	0,0	1200,00	3,2
19.2.10	0,0	26808,0	9,4	4184,5	18826,8	7,8	47,2	14682,8	9,6	1092,6	5891,4	5,4	839,4	2910,7	3,6	0,0	2383,39	6,3
21.6.10	0,0	21054,8	7,4	472,0	12270,0	5,1	2728,0	7582,1	5,0	1254,7	5377,5	4,9	1301,4	6661,0	8,3	74,0	0,00	
22.6.10	0,0	21054,8	7,4	2025,0	11759,0	4,9	27,1	7596,5	5,0	1001,3	5128,5	4,7	873,6	6306,9	7,9	0,0	1017,44	2,7
23.6.10	21044,0	14170,8	5,0	2978,0	13581,4	5,6	586,0	7580,5	5,0	1304,3	4359,1	4,0	1036,4	5774,4	7,2	0,0	1017,44	2,7
24.6.10	3672,0	12098,8	4,3	1759,0	12118,4	5,0	12,0	8330,5	5,4	1202,5	4238,7	3,9	964,9	5638,2	7,0	1595,6	1017,44	2,7
25.6.10	0,0	12098,8	4,3	512,0	11815,4	4,9	180,0	8174,5	5,3	646,5	4156,0	3,8	536,0	6953,4	8,7	0,0	1069,28	2,8
26.6.10										220,1			596,0	6357,4	7,9			
27.6.10													37,0	6320,4	7,9			
28.6.10	0,0	14944,8	5,3	3424,0	10949,4	4,5	115,0	8259,5	5,4	1264,4	3466,6	3,2	1006,0	6442,5	8,0	1017,4	113,04	0,3
29.6.10	0,0	15110,8	5,3	1559,0	12390,4	5,1	4349,0	7390,5	4,8	992,3	3427,7	3,1	816,5	6591,3	8,2	0,0	113,04	0,3
30.6.10	9210,0	13288,8	4,7	2966,0	9465,4	3,9	2945,2	6115,3	4,0	1057,0	4284,3	3,9	695,1	6773,0	8,4	0,0	113,04	0,3
Ø Leistung	2842,1			2417,7			1528,6			1092,2			802,6			376,7		
Ø Bestand		23889,4			20639,1			11075,7			7394,3							
Standabw.	10016,5			2326,3			2290,5			446,9			374,9			613,1		
VAKO	3,5			1,0			1,5			0,4			0,5			1,6		
Ø RW			10,5			8,5			7,2			6,8						3,7

Tabelle 5: Berechnung Reichweite

---

Bei der Berechnung der Tagesreichweiten gilt es zu erwähnen, dass jene über die durchschnittliche Tagesleistung berechnet wurden, um einen Glättungseffekt zu erzielen.

Die in Punkt 4.3.2 beschriebene  $VAKO_A$  - Berechnung spielt hier insofern eine wichtige Rolle, da es nur sinnvoll ist regelmäßig ausgelastet Arbeitssysteme einer Reichweitenberechnung zu unterziehen, ansonsten könnte die Reichweite theoretisch gegen unendlich gehen. Wie in Tab. 5 ersichtlich ist, hat die Anlage 1967 die größte mittlere Reichweite von 10,5 Tagen. Dies deutet somit darauf hin, dass die Anlagen des Arbeitssystems 1967 die größte Engpasskapazität darstellt. Wie im vorherigen Kapitel erwähnt wurde, stellt das Arbeitssystem 1007 kein Engpasssystem dar, dies kann nun auch durch die Reichweitenberechnung belegt werden. Die Reichweite beträgt in diesem Fall nur 3,7 Tage, was bedeutet, dass die Vorräte im Schnitt 2,9-mal schneller abgebaut werden wie bei Anlage 1967. Durch die Berechnung der Reichweite über den gesamten Produktionsablauf hinweg, können die Engpasssysteme somit sehr einfach identifiziert werden. Weitere wichtige Engpasssysteme stellen die Anlagen 1968, 7750, 8054 und 8051 dar. Jene Aussagen konnten auch vor Ort bei der Untersuchung im Unternehmen bestätigt werden. Um nun geeignete Korrekturmaßnahmen vornehmen zu können, sind aber weitere Analysen notwendig. Mithilfe der logistischen Kennlinientheorie sollen nun die genauen Betriebszustände der einzelnen Anlagen berechnet werden.

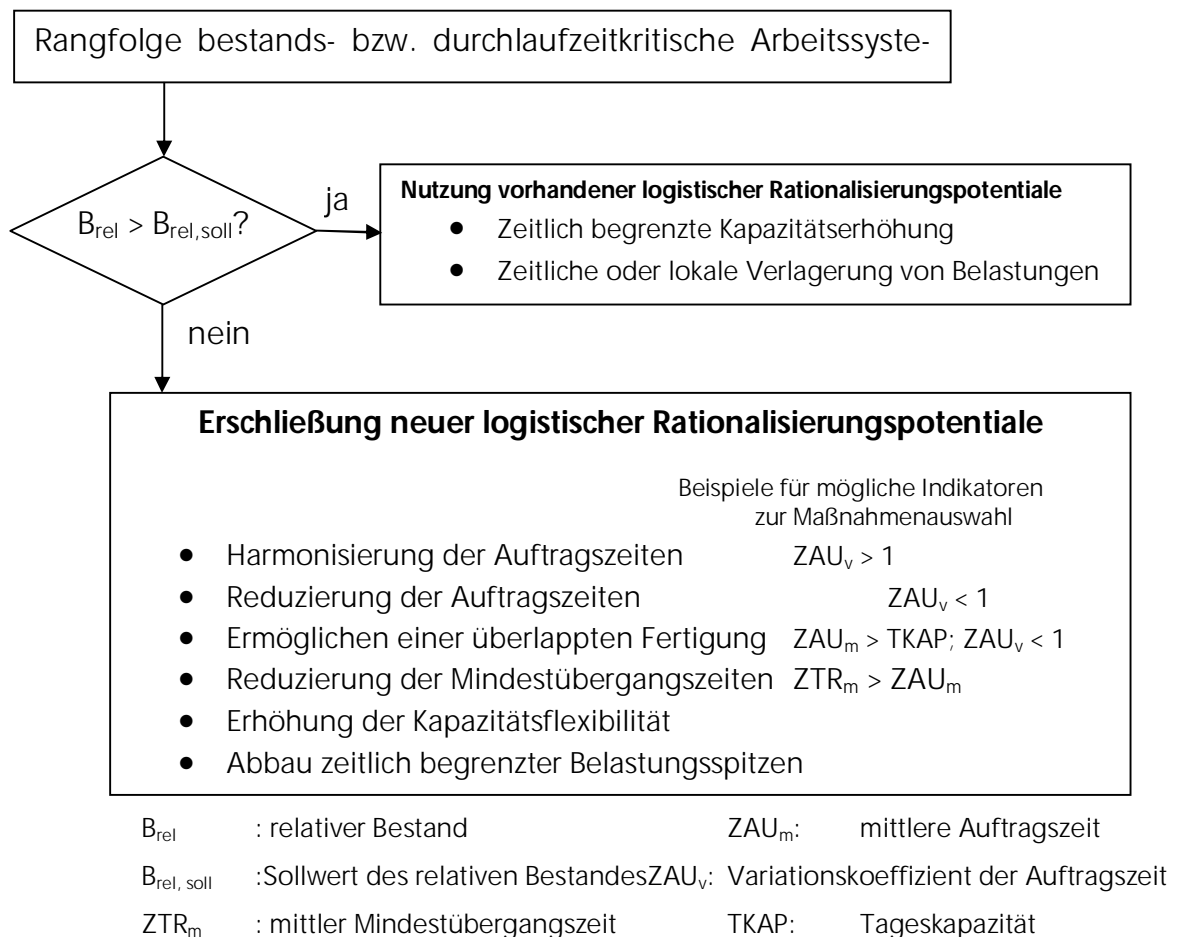
Im weiteren Vorgehen dieser Arbeit, wird nur noch das wichtigste Engpasssystem betrachtet. Alle 64 Anlagen exakt darzustellen, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Da es nicht möglich ist verallgemeinernde Lösungsvorschläge für jegliche Produktionsabläufe anbieten zu können, muss jedes Arbeitssystem im Gefüge der Gesamtproduktion für sich neu bewertet werden. Aus diesem Grund soll hier mehr auf den Analyseprozess als auf die jeweils situative Korrekturmaßnahme eingegangen werden. Der Fokus liegt somit mehr auf dem Analysetools und dessen Möglichkeiten.

## 5.4 Generelle Vorgehensweise zur Auswahl von Maßnahmen

Ausgangspunkt jeglicher Maßnahmenableitung ist die Priorisierung der logistischen Zielgrößen wie Termineinhaltung, Durchlaufzeit, Bestand und Auslastung. Obwohl bei der Kennlinientheorie die relevanten Arbeitssysteme nur anhand einer Hauptzielgröße dem Bestand dargestellt werden, kann durch die Positionierung sichergestellt, dass den anderen logistischen Kriterien ebenfalls Rechnung getragen wird.

Nyhuis stellt den relativen Bestand  $B_{rel}$  ins Zentrum seiner Betrachtungen um eine Maßnahmenableitung vornehmen zu können.<sup>82</sup> Der relative Bestand stellt das Verhältnis von  $B_m$  zu  $B_{l_{min}}$  dar. Wie in Abb. 23 ersichtlich ist, vergleicht er den gemessenen relativen Bestand  $B_{rel}$  mit dem entsprechenden Soll-Wert  $B_{rel,soll}$  um eine Maßnahmenableitung vorzunehmen.



**Abbildung 23: Erschließung logistischer Rationalisierungspotentiale<sup>83</sup>**

<sup>82</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 200 ff)

<sup>83</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 200)

Ist  $B_{rel} > B_{rel, soll}$ , sind zur Durchsetzung der vorhandenen Potentiale nur zwei grundsätzliche Maßnahmen denkbar, die zeitlich begrenzte Kapazitätserhöhung und die zeitliche oder lokale Verlagerung von Belastungen. Die Kapazitätserhöhung ist vorzuziehen, wenn im Bestand Aufträge mit Terminverzug vorliegen. Sollte eine Kapazitätserhöhung aufgrund des Erreichens der Grenzkapazität nicht mehr möglich sein, ist eine lokale Verlagerung von Teilen des Bestandes zu anderen Arbeitssystemen in Betracht zu ziehen. Dies ist natürlich nur sinnvoll, wenn jene Arbeitssysteme über freie Kapazitäten verfügen.

Bei beiden Varianten gilt es die vor- und nachgelagerten Arbeitssysteme über eine Kapazitätserhöhung zu überprüfen, da sich das Kapazitätsproblem ansonsten nur verschiebt.

Ist  $B_{rel} < B_{rel, soll}$  müssen vor einer Bestandsreduzierung zunächst neue logistische Potentiale erschlossen werden, um den idealen Mindestbestand senken zu können. Nyhuis nennt hier eine Vorauswahl interessanter Anhaltspunkte (Abb. 23) um eine Maßnahmenauswahl zu erleichtern. Jene Kennzahlen mit den Schwellwerten sind nur Anhaltswerte und sind im speziellen Anwendungsfall gegebenenfalls anzupassen. Ist der Variationskoeffizient der Auftragszeit  $> 1$  sollte eine Harmonisierung der Auftragszeiten in Betracht gezogen werden. Wie in Formel 4.21 ersichtlich ist steht eine Harmonisierung der Auftragszeit direkt mit dem idealen Mindestbestand in Verbindung. Deren genauen Zusammenhang ist aber der entsprechenden Fachliteratur zu entnehmen.<sup>84</sup> Liegt bereits eine recht ausgeglichene Auftragsstruktur vor ( $ZAU_v < 1$ ) so sind die zu erzielenden Effekte mittels Auftragszeitharmonisierung eher begrenzt und meist mit einem erhöhten Rüstaufwand verbunden. In diesem Fall gilt es zu überprüfen, ob durch neue Fertigungstechnologien oder Maßnahmen der Rüstzeitreduzierung eine generelle Auftragszeitverkürzung verwirklichen lässt.

Bei sehr großen aber gleichmäßigen Auftragszeiten ( $ZAU_m > TKAP$ ;  $ZAU_v < 1$ ) wird nur eine sehr geringe Anzahl von Aufträgen an einem Arbeitssystem abgearbeitet. In diesem Fall sollte die Möglichkeit einer überlappenden Fertigung in Betracht gezogen werden um die Auftragszeit zu reduzieren.

---

<sup>84</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 160)

---

Sind die Mindestübergangszeiten groß im Vergleich zur Auftragszeit, gilt es jene genauer zu analysieren. Bestehen jene vorwiegend aus Transportzeiten gilt es die Möglichkeit einer Layoutanpassung zu überprüfen.

### **5.4.1 Arbeitssystemanalysen**

Mit der in Punkt 5.3.3 ermittelten Reichweitenberechnung wurden die Arbeitssysteme mit den größten Engpässen ermittelt. Jene dient im weiteren Vorgehen nun als Ansatzpunkt um die engpassorientierte Logistikanalyse an den kritischen Arbeitssystem durchzuführen, und vorhandene oder ggf. zu schaffenden Ansatzpunkte für eine Durchlaufzeitreduzierung zu identifizieren. Die Kennlinientheorie soll nun an einem Arbeitssystem durchgeführt werden, um die Vorgehensweise zu veranschaulichen.

#### **Arbeitssystem 1967 (C-Schweißplatz)**

Dies ist jenes Arbeitssystem mit der größten Reichweite von 10,5 Tagen (siehe Abb. 23). In der Untersuchung vor Ort konnte ebenfalls bestätigt werden, dass es sich hier um ein Engpasssystem handelt. Aus diesem Grund wurde jenes Arbeitssystem ausgewählt, um eine detaillierte Arbeitssystemanalyse darzustellen.

Bei dem Arbeitssystem 1967 handelt es sich um eine Schweißstation mit mehreren Schweißanlagen welche im 2-Schichtbetrieb arbeitet. Bei dieser Arbeitsstation gilt es anzumerken, dass hier einzelne Bauteile zu Baugruppen und dann einzelne Baugruppen zusammengeschweißt werden. Die Auftragsrückmeldung erfolgte somit immer erst bei Fertigstellung des gesamten Arbeitsauftrages. Dies ist in der Bestandsrechnung (Abb. 23) aber deutlich ersichtlich.

Die maximale Leistungskapazität konnte von der Firma nicht genau vorhergesagt werden und wurde daher aus den Produktionsdaten gemäß der Näherungsgleichung<sup>85</sup> mit 2843,01 Minuten pro Tag berechnet.

---

<sup>85</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 163)

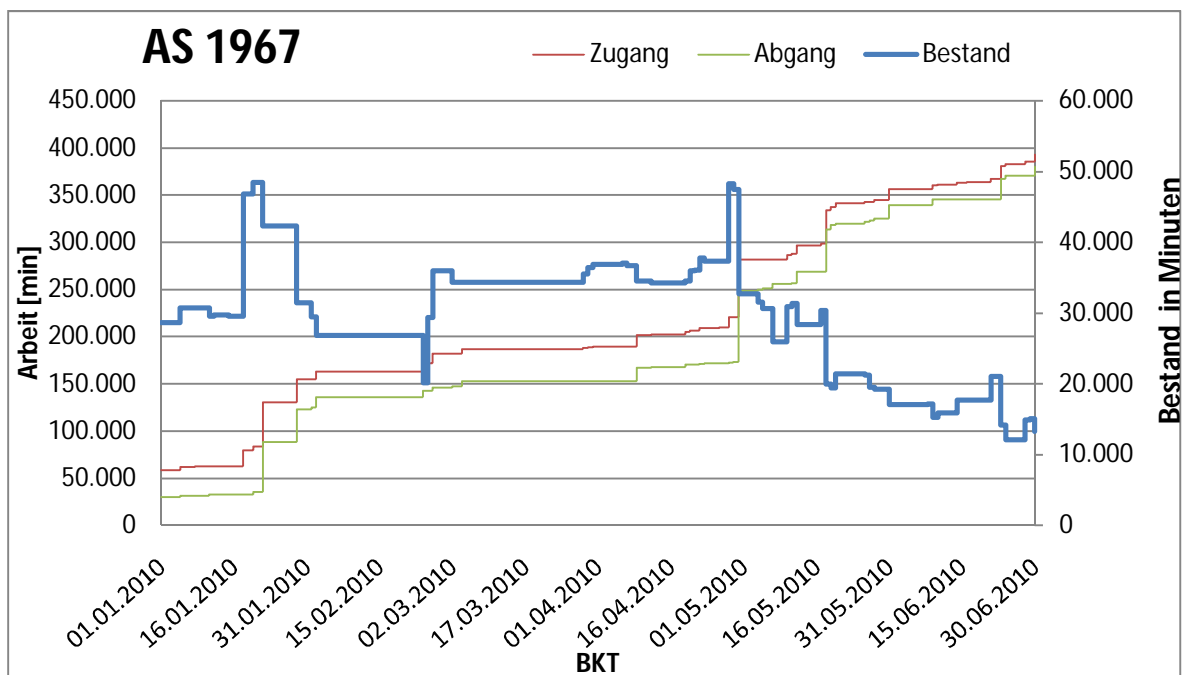
Mit den Grundlagen des Kapitels 4.2 wurden nun die relevanten Kennzahlen des Arbeitssystems 1967 berechnet.

Arbeitssystem 1967	
n	198
$L_m$ [min]	2842,1
$B_m$ [min]	23889,4
$Bl_{min}$ [min]	2242,11
$B_{rel}$ [%]	1065,5
$R_m$ [Tage]	10,5
$ZAU_m$ [min]	1259,92
$ZAU_v$	0,88
$ZDL_v$ [Tage]	2,44

**Tabelle 6: Kennzahlen AS 1967**

Der  $ZAU_v$  von 0,88 lässt auf eine inhomogene Auftragszeitverteilung schließen. Der hohe Variationskoeffizient der Durchlaufzeit ( $ZDL_v$ ) fällt auf, was sich durch ausgeprägte Reihenfolgevertauschungen und durch die inhomogenen Auftragszeitverteilung erklären lässt.

Gemäß Abschnitt 4.2.2 wurde weiters das Durchlaufdiagramm erstellt. Aus dem Durchlaufdiagramm sind die Zugänge und Abgänge und der daraus resultierende Bestandsverlauf ersichtlich.

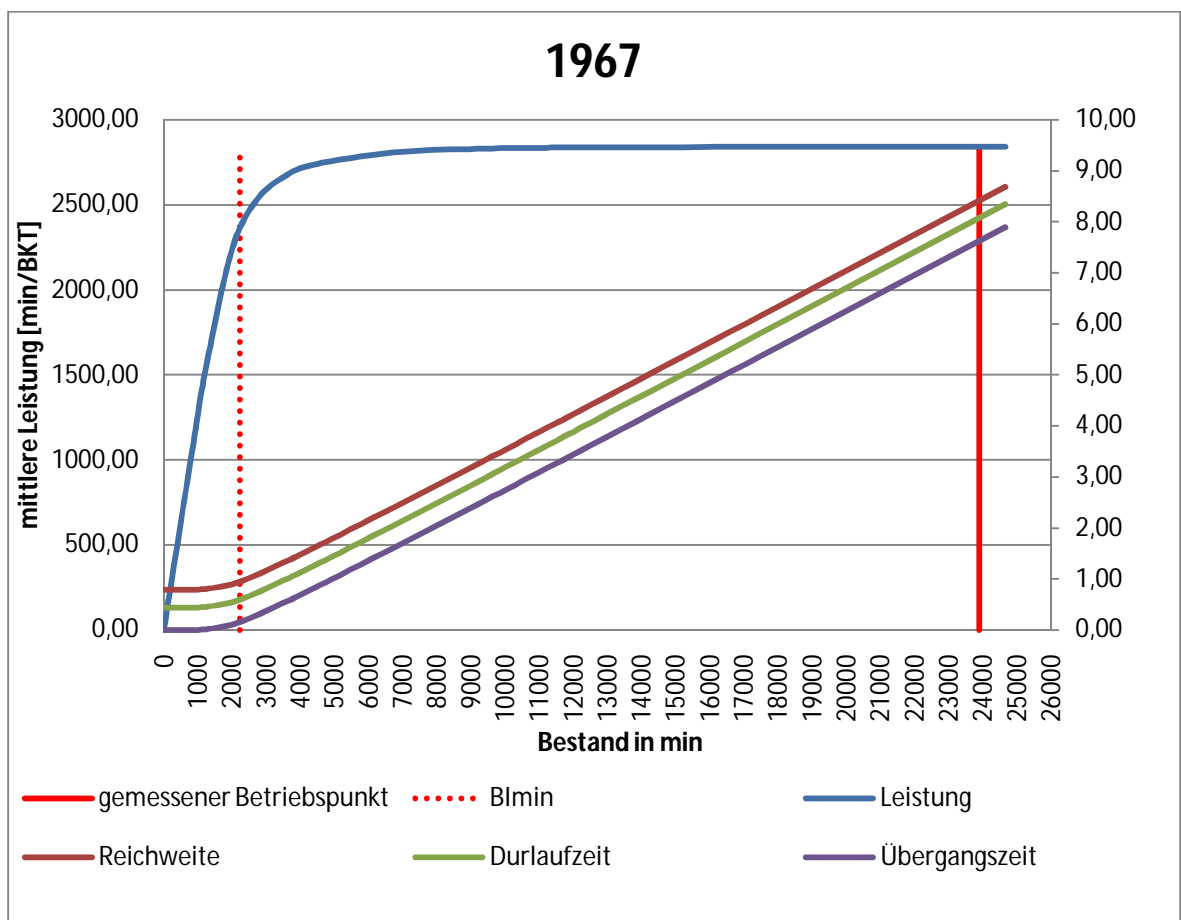


**Abbildung 24: Durchlaufdiagramm AS 1967**

Aufgrund des Durchlaufdiagrammes ist ersichtlich, dass das Arbeitssystem im gesamten Untersuchungszeitraum im Überlastbereich (vgl. Abb.21) betrieben wurde.

Darauf weist auf der stetig hohe Bestand über den Untersuchungszeitraum hin. Auffällig ist auch der sehr unregelmäßige Bestandsverlauf, was auf eine schlechte Abstimmung der Zugangs- mit der Abgangsrate hinweist.

Mit Hilfe der Kennlinienteknik wurden nun die Produktionskennlinien (vgl. Formel 4.24 - Formel 4.29) berechnet.



**Abbildung 25: Produktionskennlinien für AS 1967**

Aus der Produktionskennlinie ist somit ersichtlich, dass der mittlere Bestand mit 29889,4 Minuten extrem hoch gegenüber dem idealen Mindestbestand mit 2242,11 Minuten ist. Der mittlere Bestand ist ca. 13-mal so hoch wie der Bestand sein müsste, um auslastungsbedingte Verluste vermeiden zu können.



An diesem Arbeitssystem sind somit Bestandssenkungen unumgänglich, um die Durchlaufzeit minimieren zu können. Wie es scheint liegt an diesem Arbeitssystem eine zu geringe Grundkapazität vor, um die anfallende Arbeit an diesem Arbeitssystem abzuarbeiten. Gemäß Abschnitt 5.4 ist eine Kapazitätserhöhung somit unumgänglich um die Bestandsanhäufung abzubauen. Da der mittlere Bestand so extrem viel höher ist als der ideale Mindestbestand wurde in diesem Fall sogar eine Betriebsmittelinvestition (vgl. Tab. 12) vorgeschlagen. Die Einführung einer zusätzlichen Schicht würde für die dauerhafte Senkung der Bestände nicht ausreichen und es würde erneut zur vermehrten Bestandsbildung kommen.

Durch Betrachtung mittels Kennlinientheorie mit dessen analytischen Ansatz können subjektive Betrachtungsfehler ausgeschlossen werden. Im Kontext der gesamten Produktion sind somit Schwachstellen im Produktionsprozess analytisch messbar, was zu einer Vereinheitlichung der Vorgehensweise führt und somit für sämtliche Arbeitssysteme reproduzierbar macht.

## 5.5 Engpassysteme mittels Planproduktstückzahlen

Durch die logistische Potentialanalyse der Arbeitssysteme konnte nun zum einen die statischen Engpassysteme lokalisiert werden und zum anderen Rationalisierungspotentiale der Arbeitssysteme veranschaulicht dargestellt werden.

Im weiteren Vorgehen geht es aber nicht nur um die statischen sondern auch darum die dynamischen Engpassysteme vorzeitig zu identifizieren.

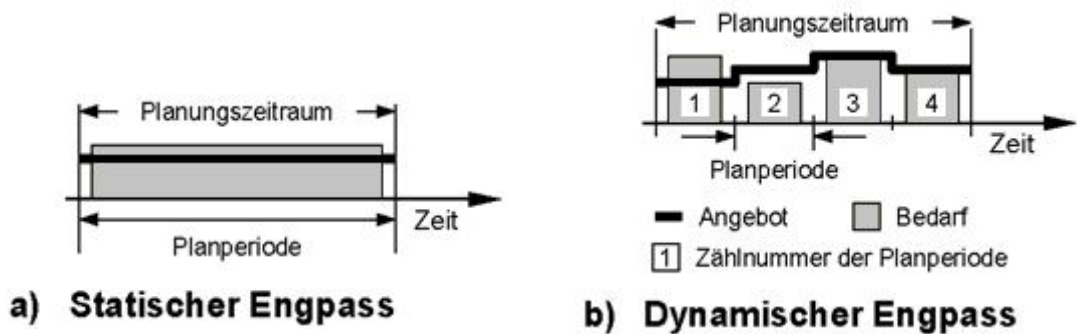


Abbildung 26: Engpässe<sup>86</sup>

Ein dynamisches Engpassystem stellt ein Arbeitssystem dar, welches nur über einen zeitlich beschränkten Zeitraum eine Unterdeckung der zur Verfügung stehenden Kapazitäten aufweist. Im Gegensatz zum statischen Engpassystem das über den gesamten Planungszeitraum das periodenbezogene Ressourcenangebot überschreitet (siehe Abb. 26). Die weitere Vorgehenseise dieser Arbeit soll nun in der Ermittlung der zukünftigen statistischen und dynamischen Engpasssystemen auf Basis von Produktstückzahlen liegen, d.h. es werden nun Plandaten zur Ermittlung der Engpasssysteme verwendet. In der Ermittlung von Engpasssystemen egal welcher Art, gibt es natürlich schon geeignete Simulationssoftware. Zweck der Arbeit liegt aber genau darin, eine einheitliche Vorgehensweise zu schaffen, um mit einfachen Mitteln, Produktionsprozesse analysieren zu können. In vielen Produktionsbetrieben würde sich die Anschaffung so einer kostenintensiven Softwarelösung wirtschaftlich nicht rechnen. Aus diesem Grund soll hier in einer schlüssigen und anhand unseres Praxisbeispiels die Vorgehensweise dokumentiert werden. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass das weitere Vorgehen vorwiegend für Werkstättenfertiger in Klein- und Mittelbetriebe geeignet ist.

<sup>86</sup> (H.H.Wiendahl & Mussbach-Winter., 2003, S. 324)

### 5.5.1 Auswertewerkzeug für die zukünftige Sollproduktion

Um ein strukturiertes Auswertetool zu entwerfen, standen am Beginn der Überlegungen, welche Daten für eine systematische Auswertung erforderlich sind. Für die Produktdefinition sind somit folgende Daten erforderlich (Tab. 7) um eine zukünftige Sollproduktion anwendungsgerecht abbilden zu können. Die gesamten Darstellungen haben hier nur beispielhaften Charakter, im Anhang wird das Fallbeispiel mit dem Fokus auf die Systemengpässe dargestellt.

Produktgruppe	Rüstzeit [min]	Bearbeitungszeit [min]	DLZ [BKT]	Auftragszeit [min]	Tag 1.3.10	Auftragszeit [min]	Tag 2.3.10
<b>A</b>					5 Stk		3 Stk
1202	13	0,40	2	15,00	40016	14,20	40017
1355	13	0,50	0	15,50	40016	14,50	40017
8054	17	1,20	5	23,00	40021	20,60	40022
7900	0	0,00	0	0,00	40021	0,00	40022
7905	0	0,00	0	0,00	40021	0,00	40022
<b>B</b>					1 Stk		1 Stk
1968	22	16,00	2	38,00	40010	38,00	40011
7700	9	1,00	3	10,00	40013	10,00	40014
7900	0	0,00	0	0,00	40013	0,00	40014
<b>C</b>					2 Stk		3 Stk
8054	13	2,20	3	17,40	40003	19,60	40004
8054	13	0,90	0	14,80	40003	15,70	40004
8054	45	2,14	5	49,29	40008	51,43	40009
1700	9	0,30	0	9,60	40008	9,90	40009
591	72	0,43	2	72,86	40014	73,29	40015
8046	47	0,60	0	48,20	40014	48,80	40015
635	68	0,34	1	68,68	40015	69,02	40016
1963	26	75,00	3	176,00	40018	251,00	40019
8046	9	0,65	0	10,30	40018	10,95	40019
7710	180	0,00	1	180,00	40023	180,00	40024
1202	26	1,20	0	28,40	40023	29,60	40024
9561	0	0,20	1	0,40	40024	0,60	40025
...	...	...	...	...	.	...	...

**Tabelle 7: Produktstammdaten (beispielhaft)**

Wie in Tabelle 7 ersichtlich ist definieren sich die Produktgruppen über deren chronologischen Durchlauf in der Produktion, beispielsweise durchläuft Produkt B die Arbeitssysteme 1968, 7700 und 7900. Um die Belastung der jeweiligen Arbeitsstation berechnen zu können müssen Rüstzeit und Bearbeitungszeit jedes Arbeitsvorganges vorgegeben werden. Ebenso muss die mittlere Durchlaufzeit

---

gegeben sein, um einen realitätsnahen Produktionsdurchlauf simulieren zu können. Die Durchlaufzeiten sind die durchschnittlichen Durchlaufzeiten der verschiedenen Anlagen.

Um ein möglichst flexibles und detailgenaues Planungsmodell anzubieten, ist es notwendig die Sollproduktion tagesweise eingeben zu können. Aufgrund der geplanten Tagesproduktion errechnet sich somit die Tagesauftragszeit welche für das jeweilige Arbeitssystem zu verbuchen ist. Anzumerken gilt hier, dass die Rüstzeit nicht tagesstückabhängig ist, sondern pro Auftrag nur einmal in die Berechnung mit einfließt. Mit der Angabe der Durchlaufzeit, wird somit automatisch festgelegt zu welchem Zeitpunkt der Arbeitsauftrag in die Produktion eingespeist wird. Durchlaufzeit von Null bedeutet, dass der Zugang wie Abgang am selben Tag erfolgt. Wird am 1.3.2010 von Produkt B ein Stück produziert, wird aufgrund der Durchlaufzeit von 2 Tagen die Auftragszeit von 38 Minuten der Anlage 1968 erst am 3.3.2010 zugerechnet. Durch die verschiedenen Arbeitsvorgänge mit deren Durchlaufzeiten hat dies zur Folge, dass Produkt B somit erst am 3.3.2010 fertiggestellt ist.

Das Auswertetool kann somit auch als Planungsinstrument für die Terminkoordination herangezogen werden, d.h. wann muss die Auftragsfreigabe stattfinden um zeitgerecht liefern zu können.

Neben den Produktstammdaten müssen die individuellen Arbeitssystemdaten definiert werden. Dazu zählen die Systemparameter Anzahl der Schichten und Anzahl der zur Verfügung stehenden Kapazitäten (Personal, Maschinen...). Wie in Tabelle 8 nun ersichtlich ist, kann auch hier eine tagesgenaue Plankapazität wie folgt berechnet werden. In der Berechnung der Kapazitäten wird mit einer Arbeitsschicht mit 8 Stunden gerechnet. Um die Gesamtkapazität variabel zu gestalten, können auch halbe Schichten zur Berechnung der Kapazitätsberechnung verwendet werden. Jene Systemkapazitäten stellen somit die maximalen Leistungswerte der einzelnen Produktionsanlagen dar.

Tag	Anlage 8054	Schichten	Kapazität	Anlage 8055	Schichten	Kapazität	Anlage 8043	Schichten	Kapazität
01.03.10	480	1	1	960	1	2	480	1	1
02.03.10	1920	2	2	480	1	1	480	1	1
03.03.10	240	0,5	1	480	1	1	480	1	1
04.03.10	720	1,5	1	480	1	1	480	1	1
05.03.10	1440	3	1	480	1	1	480	1	1
08.03.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09.03.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.03.10	480	1	1	480	1	1	480	1	1
11.03.10	480	1	1	480	1	1	480	1	1
12.03.10	480	1	1	480	1	1	480	1	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

**Tabelle 8: Plankapazitäten (beispielhaft)**

In Kombination der Produktstammdaten und Plankapazitäten der einzelnen Anlagen ist nun die Sollplanung darstellbar. Mithilfe von Excel kann nun aufgrund der Sollstückzahl die Tagesbelastung der einzelnen Arbeitssysteme berechnet (Tab. 9) werden.

Datum	8043 Belastung [min]	8055 Belastung [min]	8054 Belastung [min]
01.03.10	0,00	0,00	329,50
02.03.10	432,00	195,00	831,80
03.03.10	237,60	350,10	771,00
04.03.10	390,60	249,30	816,60
05.03.10	742,85	249,30	816,60
08.03.10	919,60	249,30	816,60
09.03.10	822,40	249,30	847,60
10.03.10	984,40	294,80	873,60
11.03.10	978,90	294,80	939,28
12.03.10	978,90	294,80	939,28
15.03.10	978,90	294,80	536,28
16.03.10	741,30	181,70	339,51

**Tabelle 9: Systembelastung (beispielhaft)**

Mithilfe der berechneten Belastungen, kann nun der jeweilige Tagesbestand der Anlagen berechnet werden. Der Bestand berechnet sich aus den zugehenden und der schon im System befindlichen Aufträgen minus der zur Verfügung stehen Plankapazität (vgl. Abb.14). Mit den gegebenen Belastungen (Tab. 9) und Plankapazitäten (Tab. 8) ergibt sich nun folgende Bestandsbildung der angeführten Ar-

beitssysteme. Die genaue Bestandsberechnung wird in Abschnitt 6.5 anhand des Beispiels genau erläutert.

Tag	8043 Bestand [min]	8055 Bestand [min]	8054 Bestand [min]
01.03.10	0,00	0,00	0,00
02.03.10	0,00	0,00	0,00
03.03.10	0,00	0,00	531,00
04.03.10	0,00	0,00	627,61
05.03.10	262,85	0,00	4,21
	262,85	0,00	4,21
	262,85	0,00	4,21
08.03.10	1182,45	249,30	820,81
09.03.10	2004,85	498,60	1668,42
10.03.10	2509,25	313,40	2062,02
11.03.10	3008,15	128,20	2521,30
12.03.10	3507,05	0,00	2980,58
	3507,05	0,00	2980,58
	3507,05	0,00	2980,58
15.03.10	1605,95	0,00	3036,86
16.03.10	0,00	0,00	2896,37
17.03.10	0,00	0,00	2617,48
18.03.10	0,00	0,00	2461,83
19.03.10	0,00	0,00	2454,07
20.03.10	0,00	0,00	2417,72
...	...		

**Tabelle 10: Bestandsberechnung (beispielhaft)**

Im der weiteren Vorgehenseise, gilt es nun gegebene Engpasssysteme zu identifizieren, was wieder mit Hilfe der Reichweitenberechnung erfolgen soll. Es wird nun die Tagesreichweite der einzelnen Arbeitssysteme berechnet vgl. Formel 4.24. In Tab. 11 ist die Berechnung der Tagesreichweite der verschiedenen Arbeitssysteme dargestellt und die Engpasssysteme können sofort identifiziert werden.

Tag	8043 [BKT]	8055 [BKT]	8054 [BKT]
01.03.10	0,00	0,00	0,00
02.03.10	0,00	0,00	0,00
03.03.10	0,00	0,00	2,21
04.03.10	0,00	0,00	0,87
05.03.10	0,55	0,00	0,00
08.03.10	1,46	0,00	0,71
09.03.10	2,18	0,00	1,48
10.03.10	3,23	0,00	2,30
11.03.10	4,27	0,00	3,25
12.03.10	5,31	0,00	4,21
15.03.10	0,22	0,00	4,33
16.03.10	0,00	0,00	4,03
17.03.10	0,00	0,00	3,45
18.03.10	0,00	0,00	3,13
19.03.10	0,00	0,00	3,11
20.03.10	0,00	0,00	3,04
...	...		

**Tabelle 11: Reichweitenberechnung (beispielhaft)**

Wie in oben stehender Abbildung ersichtlich ist, handelt es sich bei Arbeitssystem 8054 gemäß Definition vgl. Abschnitt 5.5 um ein statisches Engpasssystem. Lösungsansätze um jene Engpasssystem aufzulösen werden in Abschnitt 5.4 gegeben.

Bei Anlage 8043 handelt es sich hingegen um ein dynamisches Engpasssystem. In folgendem Abschnitt werden nun Reaktionsmöglichkeiten dargestellt um dynamische Engpässe mittels Kapazitätsflexibilität auflösen zu können.

## 6 Rationalisierungspotential mittels flexibler Kapazitäten

Die Kapazitätssteuerung entscheidet im Allgemeinen über den Einsatz von Unternehmensressourcen (Mitarbeiter, Betriebsmittel...), sie legt damit z.B. Überstunden oder Arbeitszeitreduktionen fest. Die Kapazitätssteuerung ist daher fester Bestandteil des fertigungssteuerungs Modell nach Lödding (vgl. Kapitel 3). Flexible Kapazitäten sind eine wesentliche Voraussetzung für die Leistungsfähigkeit der Werkstattsteuerung, um somit dynamische Engpässe auszuregeln, gilt es die Kapazitätsflexibilität der einzelnen Anlagen zu nutzen. Die Kapazitätsflexibilität beschreibt die Fähigkeit einer Kapazitätseinheit, das Kapazitätsangebot in kurzer Zeit verändern zu können. Je kurzfristiger, stärker und aufwandsärmer das Kapazitätsangebot verändert werden kann, desto höher ist die Kapazitätsflexibilität.<sup>87</sup> Das Kapazitätsangebot eines Arbeitssystems beschreibt dabei die Möglichkeiten, über eine bestimmte Zeitdauer eine bestimmte Leistung anzubieten zu können.<sup>88</sup> Jedes Unternehmen sollte somit an einer möglichst effizienten, bedarfsgerechten Bereitstellung von Unternehmensressourcen interessiert sein.

Die Kapazitätsflexibilität im Bereich der Personalressourcen darf aber nicht zu Lasten der Mitarbeiter gehen und ist unter humanen und sozialen Aspekten zu gestalten.

### 6.1 Kapazitätshüllkurven

Um die Kapazitätsflexibilität eines Unternehmens darzustellen werden sogenannte Kapazitätshüllkurven<sup>89</sup> verwendet. Die Kapazitätshüllkurven stellen über die Reaktionszeit dar, welche zusätzliche Kapazitäten am Arbeitssystem bereitgestellt bzw. Überkapazitäten abgebaut werden können. Darüber hinaus ist ersichtlich wie lange diese Maßnahmen aufrecht zu erhalten sind und welcher zusätzliche Betrag an Kapazität zur Verfügung gestellt oder abgebaut werden muss. Es kann somit recht einfach ermittelt werden, ob die zusätzliche Kapazität zu diesem Zeitpunkt überhaupt zur Verfügung gestellt werden kann. Ebenso lassen sich Überkapazitäten schnell ermitteln, welche zu Auslastungsverlusten führen würden.

---

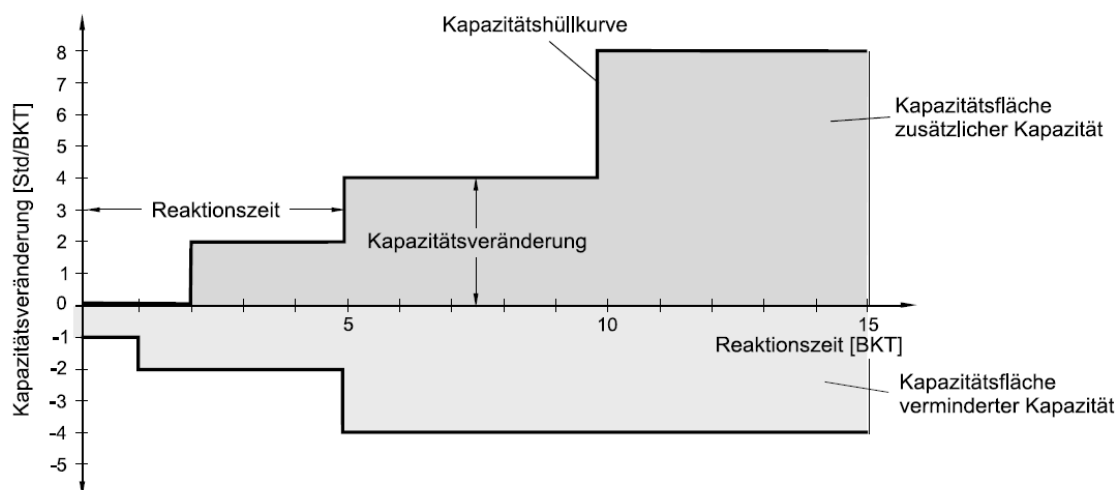
<sup>87</sup> (Begemann, 2005, S. 34)

<sup>88</sup> (Nyhuis & H.-P.Wiendahl, 1999, S. 67)

<sup>89</sup> (Wiendahl, Breithaupt, & Hernández, 2000, S. 144ff)



Zur Visualisierung der Kapazitätsflexibilität werden nun sogenannte Kapazitätshüllkurven für jede Anlage erstellt. Dies sind Kurven in Treppenform und geben somit deren Kapazitätsflexibilität in Abhängigkeit der Reaktionszeit wieder.



**Abbildung 27: Kapazitätshüllkurven<sup>90</sup>**

Im Beispiel (Abb. 27) kann nun eine zusätzliche Kapazität von 2 Stunden pro BKT mit einer Reaktionszeit von Tagen bereitgestellt werden, 4 h/BKT in 5 Tagen usw. Das Diagramm der Kapazitätshüllkurven visualisiert zum Kapazitätsaufbau ebenso Betrag und Reaktionszeit für den Kapazitätsabbau.

Nicht nur die Stufen der Kapazitätsanpassung und deren Reaktionszeiten bestimmen die Kapazitätsflexibilität eines Arbeitssystems, zusätzlich wird jene auch von der Mindestinstallationszeit (Abb. 28) mitbestimmt, also dem Zeitraum für den die Kapazitätsanpassung mindestens aufrecht erhalten bleiben muss.

Das Produkt aus Mindestinstallationszeit und zusätzlicher Tageskapazität gibt die mindestens bereitgestellte Gesamtkapazität in Stunden wieder. Ist die bereitgestellte Gesamtkapazität größer als die zum Bestandsabbau benötigte Kapazität, so ist die Kapazitätsanpassung unter wirtschaftlichen Aspekten nicht rentabel. Die oftmals sehr kostenintensiven kapazitiven Maßnahmen (Überstunden, zusätzliche Schichten...) führen dann zu Auslastungsverlusten.

<sup>90</sup> (Breithaupt, 2001)

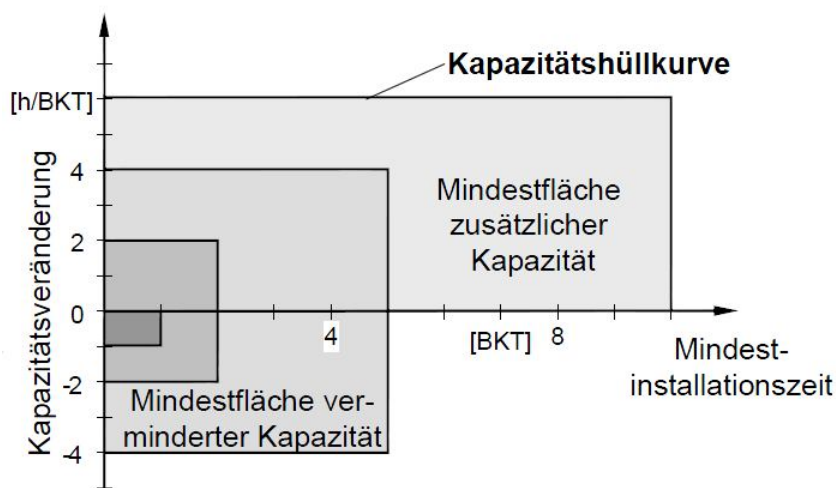


Abbildung 28: Kapazitätshüllkurve der Mindestinstallationszeit<sup>91</sup>

Zur Veranschaulichung der Mindestinstallationszeit soll dies nun anhand eines kurzen Beispiels erläutert werden.<sup>92</sup>

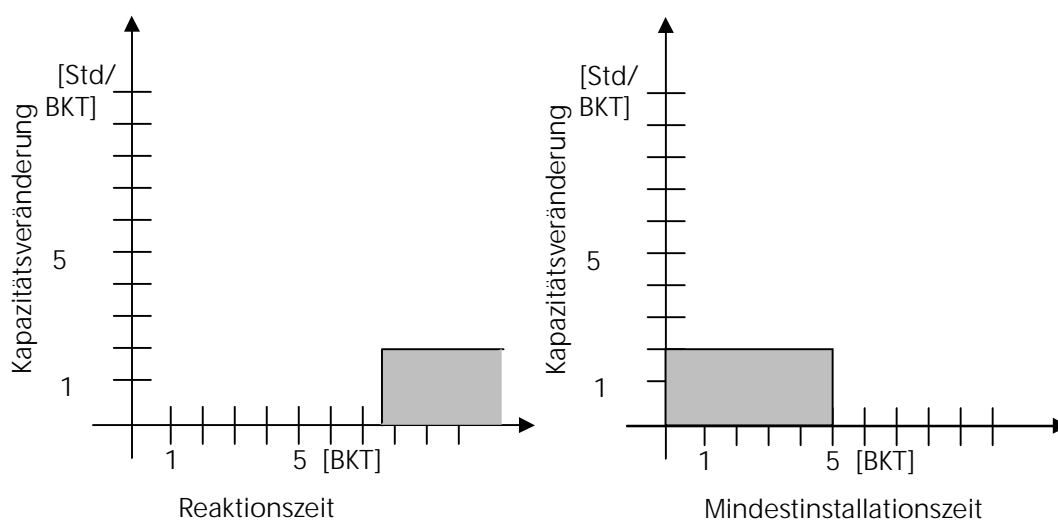


Abbildung 29: Kapazitätsflexibilität vs. Mindestinstallationszeit

Das Unternehmen kann mit Wirkung zum Montag der übernächsten Woche täglich 2 Überstunden leisten, daraus ergeben sich folgende Reaktionszeiten, 5 BKT (Anforderung Schichtende am Freitag), 10 BKT (Anforderung Schichtanfang am Montag), mit einem Mittelwert von 7,5 BKT. Darüber hinaus ist dann die gesamte Woche mit 2 Überstunden pro BKT zu arbeiten, woraus sich dann eine Mindestinstal-

<sup>91</sup> (Breithaupt, 2001)

<sup>92</sup> (Wiendahl, Breithaupt, & Hernández, 2000, S. 145)

lationszeit von 5 BKT ergibt. Die zusätzlich zur Verfügung gestellte Mindestkapazität

beträgt also 10 Stunden. Der Bestand sollte somit einen Arbeitsinhalt von mindestens 10 Stunden betragen.

## **6.2 Kapazitätsflexibilität der Betriebsmittel**

Grundsätzlich ist es schwierig, eine nennenswerte Kapazitätsflexibilität der Betriebsmittel zu erreichen, folgende Maßnahmen zur Flexibilisierung stehen aber zur Verfügung.<sup>93</sup>

### **Veränderung der Anzahl der Betriebsmittel**

Ein Unternehmen kann Betriebsmittel kaufen oder verkaufen, mieten oder vermieten um die Kapazität den Anforderungen anzupassen. Dies ist eine sehr kostenintensive Möglichkeit und muss daher unter wirtschaftlichen Aspekten der Betriebsführung sehr genau geprüft werden. Die Kapazitätsflexibilität mittels Maschinenkauf zu erhöhen ist eher selten und Firmen greifen daher nur unter sehr außergewöhnlichen Umständen (z.B. hohe Konventionalstrafe für verspätet Aufträge) auf diese Möglichkeit zurück.

### **Veränderung der Betriebsmittelintensität**

Zum Teil ist es möglich Bearbeitungsgeschwindigkeiten der Betriebsmittel zu steigern, z.B. Schnittgeschwindigkeiten einer Drehmaschine. Erhöht man die Schnittgeschwindigkeit der Drehmaschine, erhöht sich der Durchsatz der Maschine und Bestände können schneller abgebaut werden. Dies hat jedoch einen erhöhten Werkzeugverschleiß zur Folge, da die wirtschaftlich optimale Schnittgeschwindigkeit meist unter der maximalen Leistungskapazität liegt. In der Praxis ist jene Möglichkeit der Betriebsmittelflexibilisierung aber meist sehr begrenzt.

---

<sup>93</sup> (Lödding, 2005, S. 472 f)

### **Fremdvergabe von Aufträgen**

Die Fremdvergabe von Aufträgen ist ein probates Mittel um Bestände kurzfristig abzubauen. Eine langfristige Vergabe von Fremdaufträgen um somit eine scheinbare Kapazitätserhöhung zu erreichen gilt es kritisch zu untersuchen und wurde von Windt intensiv analysiert<sup>94</sup>.

### **Verschieben von Wartungsarbeiten**

Um Bestände kurzfristig abbauen zu können, ist es eventuell möglich anstehende Wartungsarbeiten nach hinten zu schieben um die Betriebsmittel zu einem Zeitpunkt hoher Auslastung voll ausnützen zu können und jene zu einem Zeitpunkt bei geringer Belastung durchzuführen. Zu erwähnen gilt es hier aber, dass es sehr riskant sein kann Wartungsintervalle nicht einzuhalten, die Wartungsarbeiten müssen zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt werden und der Kapazitätsausfall wird somit nur verschoben.

### **Verlagerung auf alternative Betriebsmittel**

Gelegentlich ist es möglich bestimmte Arbeitsvorgänge auf andere Maschinen zu verlagern. Artverwandte Maschinen bieten oftmals das gleiche Leistungspotential, werden aber aus wirtschaftlichkeitsgründen nicht verwendet. Ein Beispiel ist die Verlagerung auf eine größere Maschine obwohl dies von den Dimensionen her nicht notwendig wäre.

## **6.3 Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter**

Wie oben schon erwähnt ist die Kapazitätsflexibilität der Betriebsmittel eher gering und es wird daher vermehrt auf die Flexibilität der Mitarbeiter gesetzt. Jede Firma zielt auf eine möglichst flexible Arbeitszeiteinteilung der Mitarbeiter ab. Die Flexibilität setzt sich aus Arbeitszeitflexibilität, der Flexibilität in der Einstellung und Entlassung von Mitarbeitern und Mehrfachqualifizierung von Mitarbeitern zusammen.<sup>95</sup>

---

<sup>94</sup> (Windt, 2001)

<sup>95</sup> (Lödding, 2005, S. 473 ff.)

### **Arbeitszeitflexibilität**

Überstunden, Wochenendschichten und Kurzarbeit sind die am weitesten verbreiteten Maßnahmen um die Standardarbeitszeit zu flexibilisieren. Die Kosten und Reaktionszeiten mit denen jene Maßnahmen verordnet werden können, werden von Gesetzgeber und betrieblichen Vereinbarungen beeinflusst. Ebenso ist die maximale Arbeitszeit pro Tag und Woche vom Gesetzgeber geregelt. Um eine möglichst hohe Arbeitszeitflexibilität zu schaffen, gibt es eine Menge an verschiedenen Arbeitszeitmodellen.

### **Flexibilität in der Einstellung und Freisetzung von Mitarbeitern**

Die Einstellung und Entlassung von Mitarbeitern wird über die erforderlichen Kosten- und Zeitaufwänden der Mitarbeiterrekrutierung festgelegt. Diese Vorgehensweise ähnelt sehr der Gesetzmäßigkeit im An- und Verkauf von Maschinen, betrifft in diesem Fall aber Menschen mit sozialen und wirtschaftlichen Bedürfnissen. Die Entscheidung über die Einstellung und vor allem Entlassung von Mitarbeitern ist also nicht nur unter wirtschaftlichen sondern auch moralischen Aspekten zu überprüfen. Die Flexibilität in der Entlassung von Mitarbeitern wird im wesentlichen von den gesetzlichen Bestimmungen vorherbestimmt. Die Entlassungskosten wirken sich somit auf die Entscheidung des Arbeitgebers aus. Es gilt somit Unternehmens- und Mitarbeiterziele in Einklang zu bringen. Sind die Kosten für die Einstellung neuer Mitarbeiter sehr hoch, wird oftmals versucht mit den vorhandenen Mitarbeitern durch Überstunden, zusätzliche Schichten usw. den erhöhten Bestand abzubauen.

Vor allem in Betrieben mit saisonalem Geschäftsverlauf wird die Flexibilität durch sogenannte Mitarbeiterleasingfirmen sichergestellt. Es werden über eine gewisse Zeitdauer Mitarbeiter von Mitarbeitervermittlungsfirmen ausgeliehen um die erhöhte Nachfrage abzudecken. Die Kosten im Vergleich zu Fixanstellungen und deren Entlassungen ist verhältnismäßig gering. Jene Form der Mitarbeiterflexibilisierung ist vor allem für jene Tätigkeiten geeignet, welche nur eine kurze Einarbeitungszeit im Betrieb benötigen. Zudem ist eine leichte Planbarkeit garantiert da die Mitarbeiter zu genau festgelegten Zeitpunkten angefordert werden können.

## Mehrfachqualifizierung von Mitarbeitern

Durch die Mehrfachqualifizierung von Mitarbeitern können verschiedene Mitarbeiter mehrerer Aufgaben wahrnehmen was zu einer Flexibilisierung der Aufgabenverteilung führt. Vor allem bei modernen Fertigungsformen wie Fertigungsinseln ist eine flexible Mitarbeiterqualifikation Voraussetzung. Die Mehrfachqualifizierung ist somit eine sehr wichtige Form um die Kapazitätsflexibilität zu erhöhen

## 6.4 Maßnahmen zur Kapazitätsänderung

Der unten stehenden Maßnahmenkatalog (Tab. 12) soll nun eine Entscheidungshilfe zum Abbau von Beständen mittels Kapazitätsflexibilität darstellen. Zum einen wird dargestellt wann es sinnvoll ist im Bereich der Betriebsmittelflexibilität Maßnahmen zu ergreifen, zum anderen im Bereich der Mitarbeiterflexibilität.

	Kapazitätsänderung	Reaktionszeit [BKT]	Kapazitätsbeitrag [h/BKT]	Mindestinstallationszeit [BKT]	Aufwand
Betriebsmittel	Anzahl Betriebsmittel (Instandhaltung, Umzug...)	kurzmittel < 5	groß > 8 - 24	kurz < 1	niedrig
	Anzahl Betriebsmittel (Investition)	lang > 20	groß > 8 - 24	lang > 200	hoch
	Nutzungsgrad Betriebsmittel	kurz < 1	klein > 1 - 2	kurz < 1	mittel
Mitarbeiter	Überstunden mit flexiblen Arbeitszeitmodell	kurz < 1	klein ~ 2 - 4	kurz < 1	niedrig
	Überstunden bei starren Arbeitszeitmodell	kurz < 1	klein ~ 2	kurz < 1	mittel
	Wochenendarbeit	kurz - mittel < 5 - 10	mittel > 8	kurz < 1	mittel
	Schichtmodell wechseln	mittel < 10	hoch > 8 - 16	mittel > 5	niedrig
	Mitarbeiterwechsel je KE (Mitarbeiterpool für mehrerer KE)	kurz - mittel < 1 - 5	mittel > 8	kurz < 1	gering
	Mehrmaschinenbedienung	kurz < 1	klein < 4	kurz < 1	gering
	Einstellung und Entlassung (mit Arbeitsvertrag)	lang > 20	mittel > 8	lang > 20 - 100	hoch
	Einstellung und Entlassung (Leiharbeiter)	mittel < 10	mittel > 8	mittel < 5 - 20	mittel

KE: Kapazitätseinheit; Nutzungsgrad = Leistung [h] / Planbelegungszeit [h]

**Tabelle 12: Maßnahmen zur Kapazitätsänderung<sup>96</sup>**

<sup>96</sup> (Breithaupt, 2001, S. 80)

Wie in Tabelle 12 nun ersichtlich sollte beispielsweise eine Neuinvestition von Betriebsmitteln erst in Erwägung gezogen werden wenn die Mehrkapazität 8 - 24 h pro Tag beträgt. Dies würde auf eine eindeutige Unterdeckung im Maschinenpark hinweisen. Auf Überstunden im Bereich der Mitarbeiterflexibilität wird hingegen zurückgegriffen wenn der Kapazitätsüberschuss und Mindestinstallationszeit sehr gering sind. Es ist somit von Fall zu Fall zu untersuchen, welche der erwähnten Maßnahmen sinnvoll sind.

## 6.5 Potential des Analysewerkzeugs anhand eines Beispiels

Aus unserem Fallbeispiel soll nun ein Quartal mittels Planproduktstückzahlen simuliert werden. Da in unserem Praxisbeispiel aus den Produktionsdaten nicht ersichtlich ist, um welches Produkt es sich handelt, musste vorerst eine ausführliche Produktportfolioanalyse vorgenommen werden. Nach der Identifikation der einzelnen Produkte wurden sie zu Produktgruppen zusammengefasst. Gerade bei einer variantenreichen Produktion stellt dies einen erheblichen Arbeitsaufwand dar. Da wir unsere Engpassanalyse aber auf der Grundlage von Produktplanstückzahlen durchführen wollen, ist dies unumgänglich. Durch die Analyse der Produktionsdaten gemäß Abschnitt 4.3 wird das Augenmerk vorwiegend wieder auf jene Arbeitssysteme mit den größten Engpässen gelegt werden. Die Auswertung ergab dass die in Abb. 30 dargestellten Produktgruppen den größten Anteil am Produktportfolio haben.

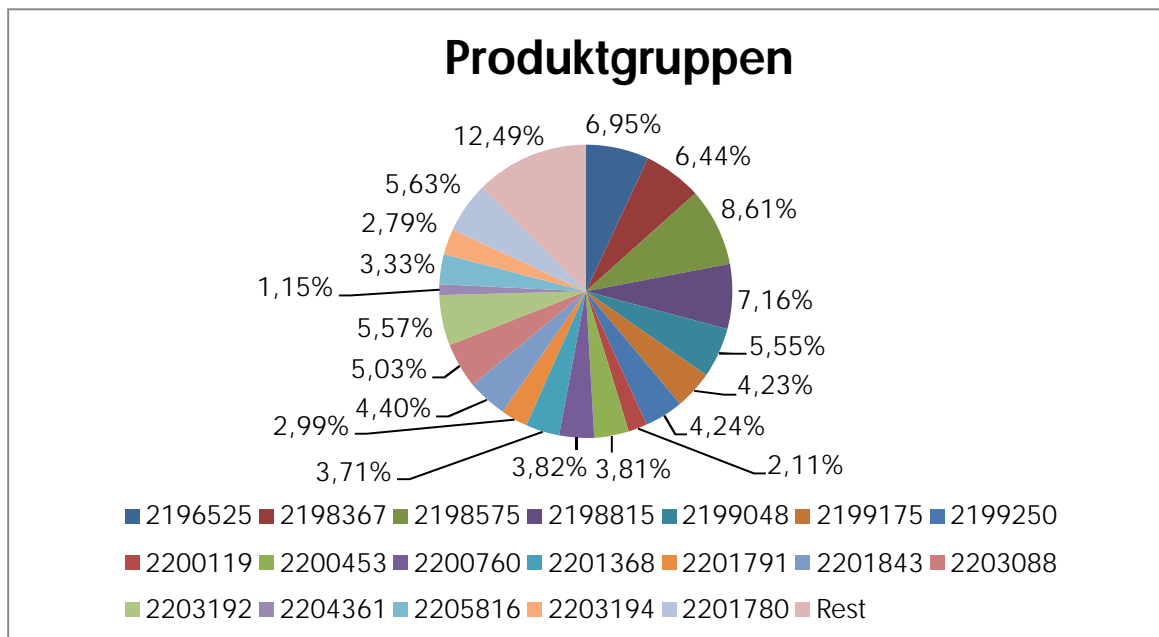


Abbildung 30: Produktgruppenverteilung



Um die Istproduktion nun annäherungsweise abzubilden, wurden mit folgenden Planwerten über den gesamten Simulationszeitraum gerechnet.

Produktgruppe	BKT 1 [Stk.]	BKT 2 [Stk.]	BKT 3 [Stk.]	BKT 4 [Stk.]	...	BKT 60 [Stk.]
2196526	8	8	8	8	...	8
2198367	9	9	9	9		9
2198575	10	10	10	10		10
2198815	8	8	8	8		8
2199048	8	8	8	8		8
2199175	6	6	6	6		6
2199250	5	5	5	5		5
2200119	10	10	10	10		10
2200453	5	5	5	5		5
2200760	5	5	5	5		5
2201368	4	4	4	4		4
2201791	4	4	4	4		4
2201843	5	5	5	5		5
2203088	7	7	7	7		7
2203192	8	8	8	8		8
2204361	1	1	1	1		1
2205816	4	4	4	4		4
2203194	4	4	4	4		4
2201780	7	7	7	7		7

**Tabelle 13: Planstückzahlen gemäß Produktportfolio**

Die maximalen Kapazitätswerte ergeben sich aus der Anzahl der gearbeiteten Schichten pro Tag und den zur Verfügung stehenden Ressourcen (Mitarbeiter Maschinen...) im Unternehmen. In Tabelle 14 sind somit die derzeitigen Normalkapazitäten der Arbeitssysteme dargestellt.

Tag [BKT]	1966 [min]	1967 [min]	1968 [min]	8043 [min]	7705 [min]	8054 [min]
1	1920	2880	2880	960	460	960
2	1920	2880	2880	960	460	960
3	1920	2880	2880	960	460	960
4	1920	2880	2880	960	460	960
5	1920	2880	2880	960	460	960
6	1920	2880	2880	960	460	960
7	1920	2880	2880	960	460	960
8	1920	2880	2880	960	460	960
9	1920	2880	2880	960	460	960
10	...	...	...	...	...	...

**Tabelle 14: Plankapazität**

## Tagesbelastung (Auftragszugang)

Aufgrund der eingegebenen Planwerte, lassen sich nun die einzelnen Tagesbelastungen über den gesamten Untersuchungszeitraum tabellarisch sowie grafisch darstellen. Beispielsweise weist Arbeitssystem 8054 ab BKT 7 eine höhere Tagesbelastung wie verfügbare Kapazität auf, was zu einer unvermeidbaren Bestandsanhäufung führt.

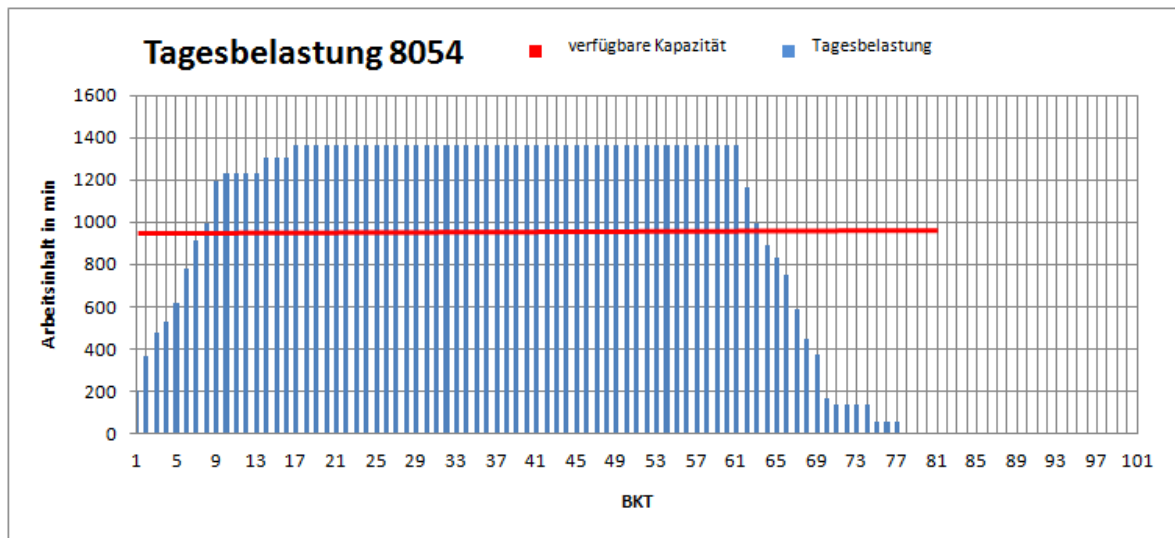


Abbildung 31: Tagesbelastung AS 8054

Eine höhere Belastung wie verfügbare Kapazität wiesen auch die Arbeitssysteme 1966, 1967, 1968 und 7705 auf. Deren tabellarische Darstellung ist im Anhang ersichtlich.

## Bestandsberechnung

Um den tagesaktuellen Bestand ermitteln zu können, muss zunächst ein Abgleich mit der zur Verfügung stehenden Kapazität, dem Auftragszugang und der schon im System befindlichen Aufträge gemacht werden, anschließend müssen eventuelle Tagesbelastungsüberschüsse anschließend dem Folgetag zugerechnet werden. Bei Arbeitssystem 8054 sind an BKT 8 beispielsweise 992,40 Minuten (Tab. 16) abzuarbeiten. Da aber nur 960 Minuten abgearbeitet werden können beträgt der Bestand an BKT 8 somit 32,40 Minuten. Jener Überschuss ist nun dem Folgetag zusätzlich zur Tagesbelastung von 1194,43 Minuten (Tab. 16) hinzuzurechnen. Die Gesamtbelastung beträgt an BKT 9 somit 1226,83 Minuten (Tab.17). Der Bestand an BKT 9 beträgt folglich 266,83 Minuten. In Tabelle 15 ist

der Bestandsverlauf in Abhängigkeit von verfügbarer Kapazität und geplanter Produktstückzahl der Engpasssysteme dargestellt.

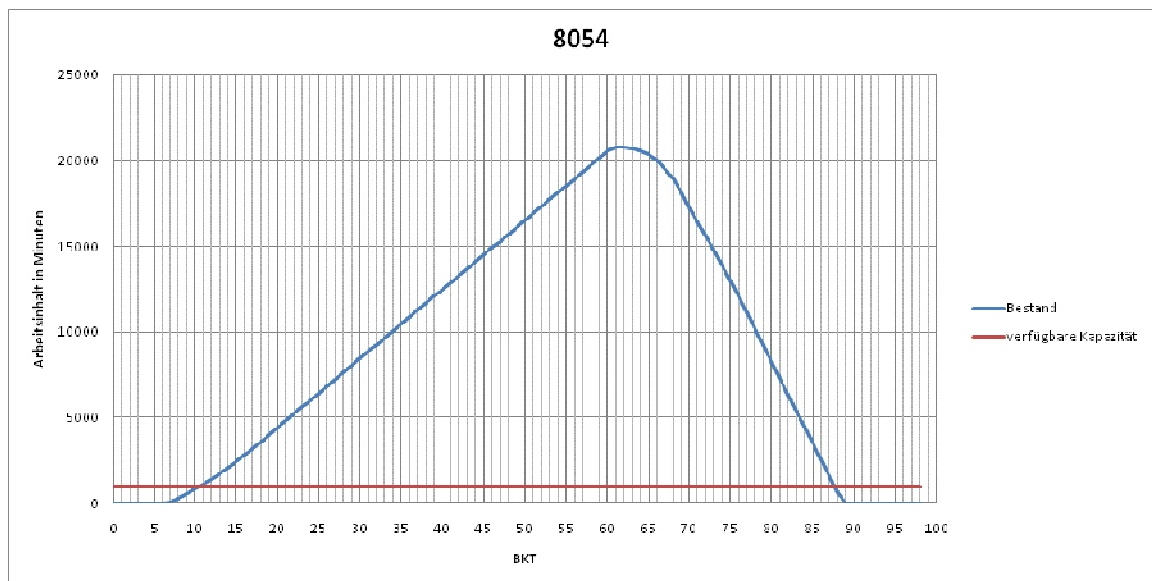
BKT	1966 Bestand [min]	1967 Bestand [min]	1968 Bestand [min]	7705 Bestand [min]	8043 Bestand [min]	8054 Bestand [min]
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,40
9	0,00	0,00	0,00	0,00	73,87	266,83
10	0,00	0,00	0,00	0,00	229,74	535,27
11	0,00	0,00	0,00	0,00	385,61	803,70
12	0,00	0,00	0,00	0,00	541,48	1072,13
13	0,00	0,00	0,00	0,00	697,35	1340,56
14	0,00	0,00	0,00	63,60	853,22	1686,69
15	0,00	0,00	0,00	63,60	1009,09	2032,82
16	0,00	0,00	0,00	148,60	1164,96	2378,96
17	0,00	0,00	0,00	148,60	1560,58	2782,89
18	0,00	0,00	0,00	184,60	1956,20	3186,82
19	0,00	444,80	0,00	244,80	2351,82	3590,75
20	378,40	889,60	0,00	265,80	2747,44	3994,68
21	756,80	1334,40	0,00	244,80	3143,06	4398,61
22	1135,20	1779,20	0,00	184,60	3538,68	4802,55
23	1513,60	2224,00	0,00	148,60	3934,30	5206,48
24	1892,00	2668,80	0,00	148,60	4329,92	5610,41
25	2270,40	3113,60	0,00	63,60	4725,54	6014,34
26	2648,80	3558,40	0,00	63,60	5121,16	6418,27
27	3027,20	4003,20	0,00	0,00	5516,78	6822,20
28	3405,60	4448,00	0,00	0,00	5912,40	7226,13
29	3784,00	4892,80	0,00	0,00	6308,02	7630,07
30	4162,40	5337,60	0,00	0,00	6703,64	8034,00
31	4540,80	5782,40	0,00	0,00	7099,26	8437,93
32	4919,20	6227,20	0,00	0,00	7494,88	8841,86
33	5297,60	6672,00	0,00	0,00	7890,50	9245,79
34	5676,00	7116,80	0,00	0,00	8286,12	9649,72
35	6054,40	7561,60	0,00	0,00	8681,74	10053,66
36	6432,80	8006,40	0,00	0,00	9077,36	10457,59
37	6811,20	8451,20	0,00	0,00	9472,98	10861,52
38	7189,60	8896,00	0,00	0,00	9868,60	11265,45

BKT	1966 Bestand [min]	1967 Bestand [min]	1968 Bestand [min]	7705 Bestand [min]	8043 Bestand [min]	8054 Bestand [min]
39	7568,00	9340,80	0,00	0,00	10264,22	11669,38
40	7946,40	9785,60	0,00	0,00	10659,84	12073,31
41	8324,80	10230,40	0,00	0,00	11055,46	12477,24
42	8703,20	10675,20	0,00	0,00	11451,08	12881,18
43	9081,60	11120,00	0,00	0,00	11846,70	13285,11
44	9460,00	11564,80	0,00	63,6	12242,32	13689,04
45	9838,40	12009,60	0,00	63,6	12637,94	14092,97
46	10216,80	12454,40	0,00	148,6	13033,56	14496,90
47	10595,20	12899,20	0,00	148,6	13429,18	14900,83
48	10973,60	13344,00	0,00	184,6	13824,80	15304,77
49	11352,00	13788,80	0,00	244,8	14220,42	15708,70
50	11730,40	14233,60	0,00	265,80	14616,04	16112,63
51	12108,80	14678,40	0,00	244,80	15011,66	16516,56
52	12487,20	15123,20	0,00	184,60	15407,28	16920,49
53	12865,60	15568,00	0,00	148,60	15802,90	17324,42
54	13244,00	16012,80	0,00	148,60	16198,52	17728,36
55	13622,40	16457,60	0,00	63,60	16594,14	18132,29
56	14000,80	16902,40	0,00	63,60	16989,76	18536,22
57	14379,20	17347,20	0,00	0,00	17385,38	18940,15
58	14757,60	17792,00	0,00	0,00	17781,00	19344,08
59	15136,00	18236,80	0,00	0,00	18176,62	19748,01
60	15514,40	18681,60	0,00	0,00	18572,24	20151,94
61	15892,80	19126,40	0,00	0,00	18967,86	20555,88
62	16271,20	19571,20	0,00	0,00	19363,48	20959,81
63	16649,60	20016,00	0,00	0,00	19759,10	21363,74
64	17028,00	20460,80	0,00	0,00	19981,92	20723,37
65	17406,40	20905,60	0,00	0,00	20234,14	20596,80
66	17784,80	19710,40	0,00	0,00	20172,01	20384,23
67	18163,20	19335,20	0,00	0,00	20049,68	20008,65
68	18541,60	18550,00	0,00	0,00	19927,35	19496,58
69	18791,00	17680,00	0,00	0,00	19432,10	18908,11
70	19040,40	16400,00	0,00	0,00	18793,85	18117,61
71	18459,80	15120,00	0,00	0,00	18073,60	17293,11
72	17879,20	12930,00	0,00	0,00	17353,35	16468,61
73	17298,60	10740,00	0,00	0,00	16633,10	15644,11
74	16099,60	8550,00	0,00	0,00	15912,85	14819,61
75	14900,60	6360,00	0,00	0,00	15192,60	13917,41
76	13701,60	4170,00	0,00	0,00	14472,35	13015,21
77	12502,60	1980,00	0,00	0,00	13752,10	12113,01
78	11303,60	0,00	0,00	0,00	12792,10	11153,01
79	10104,60	0,00	0,00	0,00	11832,10	10193,01
80	8644,60	0,00	0,00	0,00	10872,10	9233,01
81	6724,60	0,00	0,00	0,00	9912,10	8273,01

BKT	1966 Bestand [min]	1967 Bestand [min]	1968 Bestand [min]	7705 Bestand [min]	8043 Bestand [min]	8054 Bestand [min]
82	4804,60	0,00	0,00	0,00	8952,10	7313,01
83	2884,60	0,00	0,00	0,00	7992,10	6353,01
84	964,60	0,00	0,00	0,00	7032,10	5393,01
85	0,00	0,00	0,00	0,00	6072,10	4433,01
86	0,00	0,00	0,00	0,00	5112,10	3473,01
87	0,00	0,00	0,00	0,00	4152,10	2513,01
88	0,00	0,00	0,00	0,00	3192,10	1553,01
89	0,00	0,00	0,00	0,00	2232,10	593,01
90	0,00	0,00	0,00	0,00	1272,10	0,00
91	0,00	0,00	0,00	0,00	312,10	0,00
92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
...						

**Tabelle 15: Bestandsverlauf**

Durch die höhere Belastung wie verfügbare Kapazität kam es am Arbeitssystem 8054 beispielsweise bei BKT 63 zu einer Bestandsbildung von bis zu 20792,94 Minuten, welche abgearbeitet werden muss. Den stetigen Bestandsanstieg verdeutlicht die unten dargestellte Grafik sehr eingängig.



**Abbildung 32: Bestandsverlauf AS 8054**

Wie in Abb. 32 ersichtlich ist, würde es bei Arbeitssystem 8049 bis BKT 89 dauern um den Bestand wieder unter die maximale Kapazität auszureguln. Dies ist aber nur möglich, da ab BKT 61 kein Zugang mehr stattfindet. Aufgrund der hohen Belastung und damit hohen Bestandsbildung hat dies eine enorme Durchlaufzeitverlängerung zu Folge.

## Reichweite

Aufbauend auf die Bestandsrechnung wird nun die Reichweite der Arbeitssysteme berechnet. Durch die Reichweitenberechnung (Anhang Tab. 18) ist nun ersichtlich, dass das Arbeitssystem 8049 die größte Reichweite besitzt und somit jenes Arbeitssystem mit dem größten Engpass darstellt. Aus diesem Grund müssen bei diesem Arbeitssystem als erstes Maßnahmen angesetzt werden.

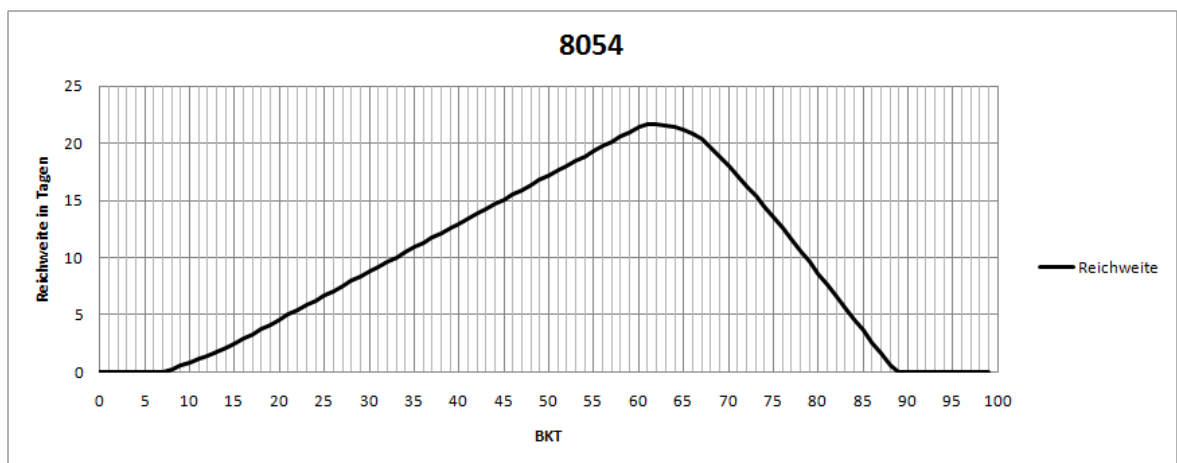


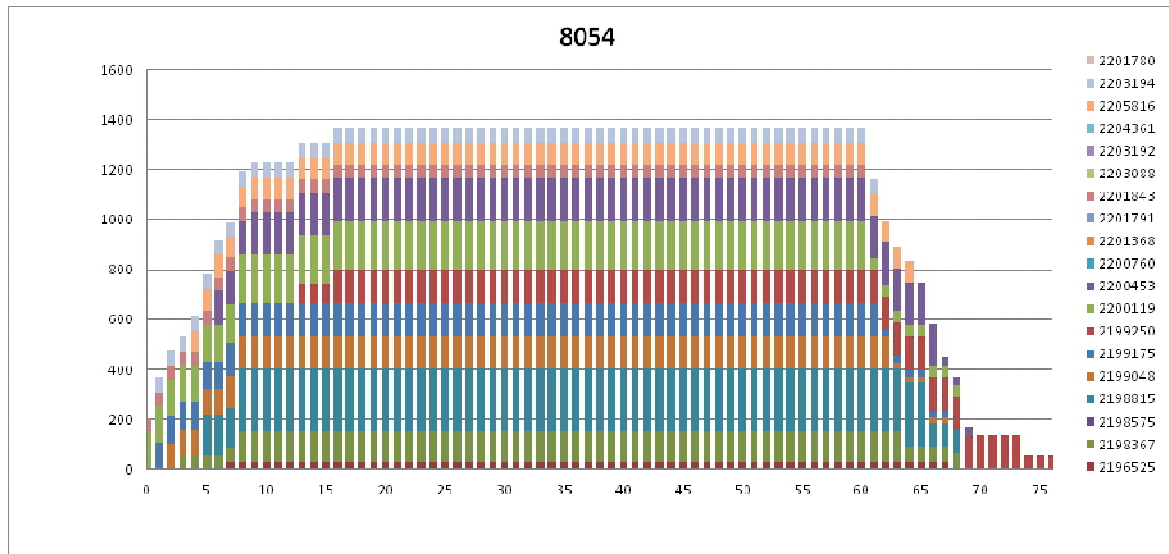
Abbildung 33: Reichweite AS 8049

Wird nun von einer kontinuierlich gleichbleibenden Belastung ausgegangen d.h. die Tagesplanstückzahl immer dieselben sind, würde an den Arbeitssystem 1966, 1967, 1968, 7705, 8043 ebenfalls immer einer Überlast vorliegen, was zur erhöhten Bestandsbildung und somit verlängerten Durchlaufzeiten führt.

## Kapazitätsflexibilität

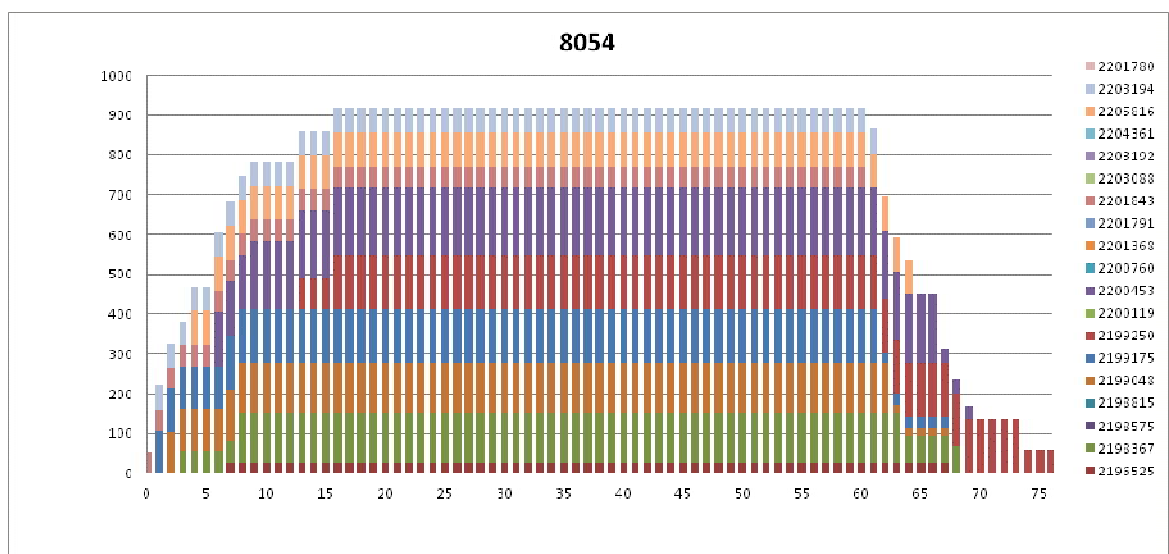
Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten um die Belastungssituation zu verändern. Zum einen können nun die Planstückzahlen derart angepasst werden um unter den gegebenen Rahmenbedingungen (Maschinen, Mensch...) den optimalen Produktmix bezüglich durchlaufoptimierter Produktion zu finden. Um den optimalen Produktionsmix zu finden, stellt Abbildung 34 den Anteil der verschiedenen Produktgruppen am Arbeitssystem über die Betriebskalendertage dar. Bei der gewählten Planproduktstückzahl stellte bei Arbeitssystem 8049 die Produktgruppe 2198815 mit einer Tagesbelastung von bis 253,6 Minuten die größte Kapazitäts-

inanspruchnahme dar. Würde dieses Produkt nun an einem Tag nicht produziert werden, würde der Kapazitätsbedarf um 253,6 Minuten sinken.



**Abbildung 34: Produktanteile am AS 8049**

Mit Hilfe dieses Werkzeugs kann nun der Produktmix so gesteuert werden, dass Produkte zu gewissen Zeiten nicht produziert werden um Engpässe zu vermeiden. Muss eine Produkt aufgrund der Marktnachfrage trotzdem produziert werden, ist sofort ersichtlich wie groß der zusätzliche Kapazitätsbedarfs des Produktes am jeweiligen Arbeitssystem ist. Wenn wir nun beispielsweise Produkt 2198815 und 2200119 aus dem Produktionsprogramm nehmen, ist sofort ersichtlich, dass die Belastung unter die maximale Belastungsgrenze von 960 Minuten abfällt.



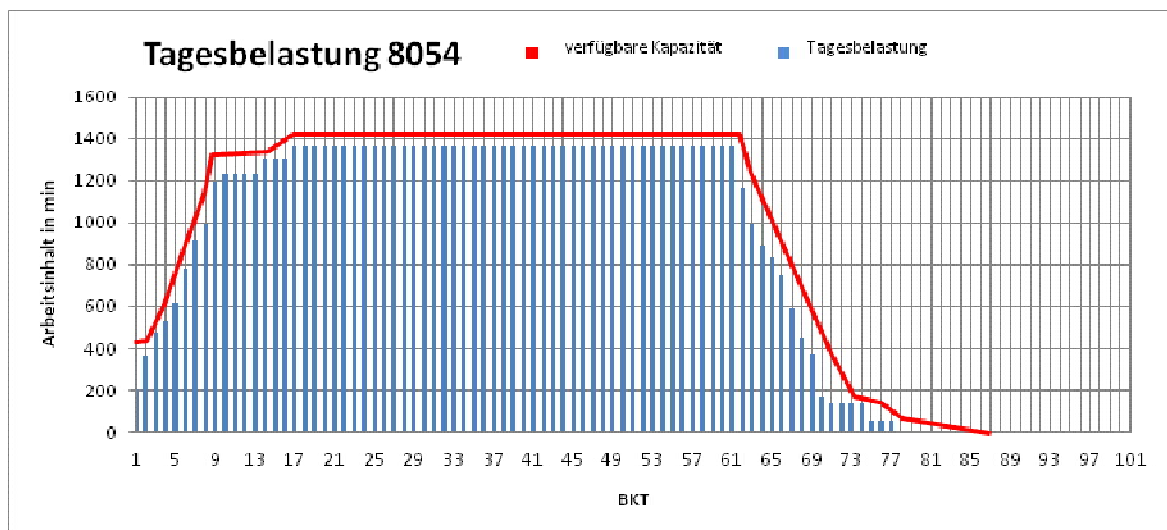
**Abbildung 35: Produktanteile am AS 8054 (ohne 2198815, 2000119)**

Da es oftmals nicht möglich ist Produkte aus dem Produktionsprogramm zu nehmen oder deren Produktion zu einem anderen Zeitpunkt zu verlagern, ist es meines Erachtens sinnvoll eine Kombination von optimalen Produktionsdurchlauf und Ausnutzung der Kapazitätsflexibilität anzustreben.

Kann die Belastung nicht unter die maximale Belastung gesenkt werden gibt es gemäß Abschnitt 5.4 nur die Möglichkeit der zeitlich beschränkten Kapazitätserhöhung. Im Rahmen der Kapazitätsflexibilität gilt es nun gemäß Kapazitätshüllkurven (vgl. Kapitel 6.1) das Potential der einzelnen Arbeitssysteme zu analysieren. Das Kapazitätsangebot kann nun innerhalb der betrieblichen Möglichkeiten so angepasst werden, dass das Produktionsprogramm ohne Bestandsaufbau produziert werden kann.

Gemäß Tabelle 12 wurde nun die Einführung einer zusätzlichen Schicht am Arbeitssystem 8054 ab BKT 9 angeordnet, um die Planstückzahlen über den Planungszeitraum fertigen zu können. Ab BKT 61 kann das Kapazitätsangebot dann wieder sukzessive verringert werden und der anfallenden Belastung angepasst werden.

Wie in Abbildung 36 nun ersichtlich ist, hatte die Einführung der zusätzlichen Schicht den Effekt, dass die Belastung nicht mehr über maximale Leistungskapazität anstieg und die geplante Produktion ohne Bestandsaufbau durchführbar ist.

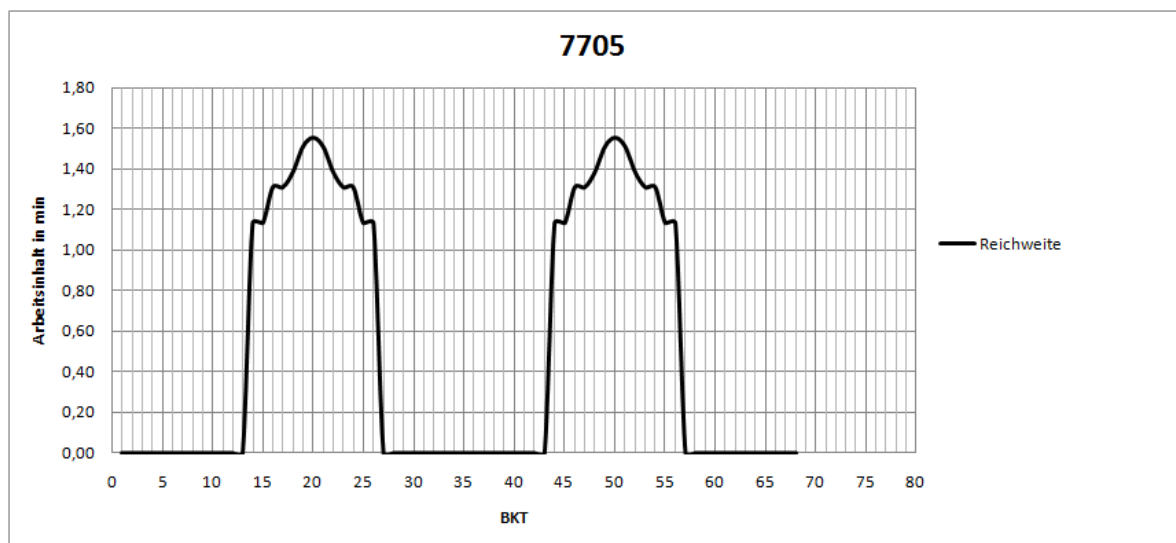


**Abbildung 36: Belastungsverlauf mit erhöhter Kapazität bei AS 8049**



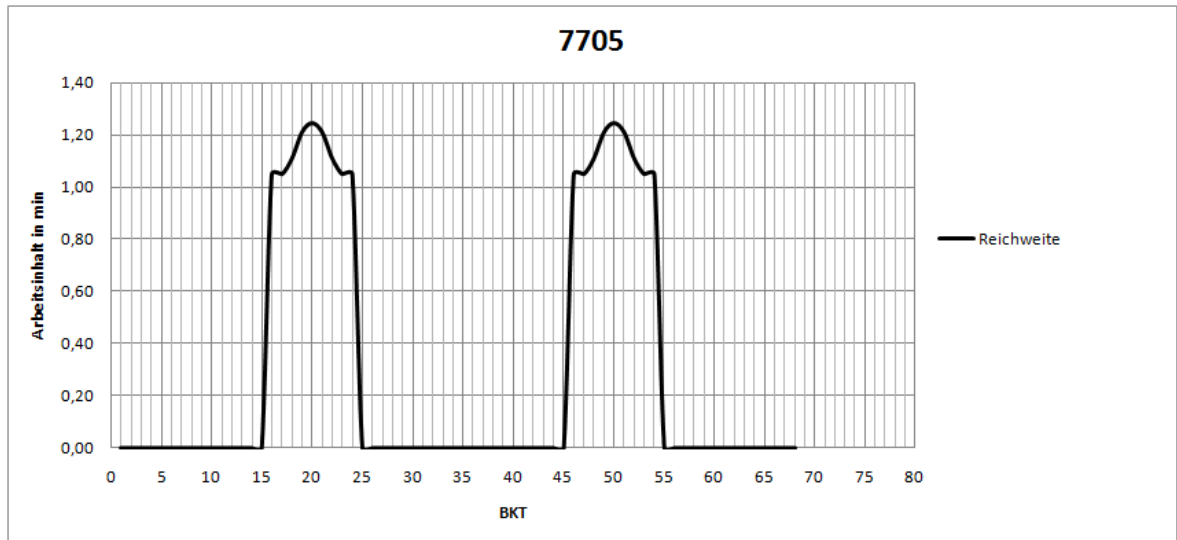
Da es sich bei den Arbeitssystemen 1966, 1967, 1968 und 8043 um sogenannte statische Engpasssysteme handelte, war die Vorgehensweise in der Planung der Kapazitäten die gleiche.

Bei Arbeitssystem 7705 handelte es sich interessanterweise um ein Arbeitssystem mit dynamischen Engpässen, obwohl die Produktionsmenge über den Simulationszeitraum dieselbe blieb. Dies erklärt sich durch die Verlagerung der Belastungen aufgrund der Durchlaufzeitverschiebung.



**Abbildung 37: Reichweite AS 7705**

Abbildung 37 zeigt den Reichweitenverlauf des Arbeitssystems 7705, ab BKT 14 ist eine Bestandsbildung zu beobachten, welche sich bis BKT 20 zu ihrem Höchstwert ansammelt. Ab BKT 21 nimmt der Bestand wieder ab und geht sogar gegen Null, bis ab BKT 43 derselbe zyklische Bestandsaufbau stattfindet. Aufgrund dieses Reichweitenverlaufes und damit verbunden Bestandsanhäufung kann die Produktionsplanung nun darauf reagieren und gemäß Abbildung 37 die geeigneten Maßnahmen anordnen. In unserem Fall werden für die BKT 14 bis 26 Überstunden im Ausmaß von 2 Stunden pro Tag angeordnet.



**Abbildung 38: modifizierte Reichweite AS 7705**

Die Einführung der Überstunden hat einen sofortigen Bestandsrückgang zur Folge was sich auch in der Reichweite widerspiegelt (Abb. 38). Der noch abzuarbeitende Bestand kann dann von BKT 25 bis BKT 45 in der Normalarbeitszeit abgearbeitet werden, da hier Kapazitätsreserven vorliegen.

## 7 Zusammenfassung/ Ausblick

Durch die Variantenvielfalt und Komplexität der heutigen Produktionsprozesse bereitet die Identifikation von logistischen Engpasssystemen immer wieder Probleme. Um die grundlegenden Produktionsprozesse verständlich darzustellen, wurden die logischen Kennlinien erläutert. Deren Anwendung anhand eines aktuellen Beispiels der Fraunhofer Research GmbH stellte die Praxistauglichkeit sicher. Darauf aufbauend wurde ein einfaches Planungsinstrument zur Darstellung von Anlagenauslastungen entwickelt. Um den Planungsprozess nun zu erleichtern, können mit dem Planungswerkzeug alle nur erdenklich möglichen Varianten der Produktsollplanung durchgeführt werden. Engpasssysteme statischer oder dynamischer Natur können mittels Reichweitenberechnung sofort identifiziert werden. Beispielsweise ist die Abbildung saisonaler Produktionszyklen möglich um den Kapazitätsbedarf vorzeitig zu bestimmen, damit rechtzeitig Maßnahmen bezüglich der Ressourcenplanung getroffen werden können. Ebenso ist eine genaue Anlagenauslastungen in Abhängigkeit von Produktgruppen darstellbar, um den Produktmix dem gegebenen Kapazitätsangebot anzupassen.

Damit eine möglichst hohe Liefertreue gewährleistet werden kann, gibt es die Möglichkeit Bestandsverläufe der einzelnen Anlagen genau darzustellen, um die Terminkoordinierung und der damit benötigten Ressourcen in Einklang zu bringen.

Um die Bestände an den sogenannten Engpasssystemen abbauen zu können, ist mit dem Maßnahmenkatalog zur Kapazitätsänderung eine leichte Entscheidungsfindung möglich.

Es wurde großen Wert darauf gelegt, die Produktionsprozesse mit einfachen Tabellenkalkulationsprogrammen abzubilden. ERP-Systeme bieten häufig keine Testumgebung um verschiedene Simulationsszenarien abbilden zu können. Dies ist oftmals nur mit sehr aufwändiger Simulationssoft-

ware möglich, welche für Klein- und Mittelbetriebe meist aber viel zu teuer sind und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten somit unrentabel sind.

Das Planungsinstrument basiert auf echten Produktionsprogrammen und es kann daher auf eine Mittelwertbetrachtung verzichtet werden. Dies bringt den unmittelbaren Vorteil mit sich, dass die gewonnenen Informationen ohne Streuungsfehler direkt in die reale Programmplanung umgelegt werden können.

Um ein Produktionsprogramm unter wirtschaftlichen Aspekten (Gewinn, Kosten, Umsatz...) zu bestimmen, könnten in Zukunft die einzelnen Stückkosten (Maschinenbelegungskosten, Rüstkosten, Personalkosten...) in das Auswertetool implementiert werden. Mit linearen Optimierungsverfahren können, in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Kapazitäten, zielmaximierende Produktionsprogramme erstellt werden und die wirtschaftliche Entscheidungsfindung somit weiter unterstützen.

---

## 8 Literaturverzeichnis

Bechte, W. (1984). *Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstättenfertigung*. Düsseldorf: VDI, Reihe 2.

Begemann, C. (2005). *Terminorientierte Kapazitätssteuerung in der Fertigung*. Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum: (Berichte aus dem IFA, 02/2005).

Bornhäuser, M. (2009). *Reifegradbasierte Werkstattsteuerung*. Dissertation Universität Stuttgart.

Breithaupt, J.-W. (2001). *Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen. Grundlagen und Anwendung. Diss. Universität Hannover 2000, veröffentlicht in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 571*. Düsseldorf.

Eidenmüller, B. (1995). *Die Produktion als Wettbewerbsfaktor*. Köln: TÜV Rheinland.

Erdlenbruch, B. (1984). *Auftragssteuerungsverfahren für die Werkstättenfertigung. Diss. Universität Hannover, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2, Nr. 71*. Düsseldorf.

Gutenberg, E. (1951). *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Band 1: Die Produktion 1. Aufl.* Berlin u.a.: Springer.

H.H.Wiendahl, & Mussbach-Winter. (2003). Engpässe identifizieren und auflösen- Engpassstrategien in MES- Software. *wt Werkstattstechnik* , 323 -326.

H.H.Wiendahl, Cieminski, G. v., & H.-P.Wiendahl. (1995). Stolpersteine der PPS. *wt Werkstattstechnik online* , 9.

Hackstein, R. (1989). *Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

---

Kettner, H., Schmidt, J., & Greim, H.-R. (1984). *Leitfaden der systematischen Fabrikplanung*. München: Carl Haser Verlag.

Lödding, H. (2005). *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Heidelberg: Springer Verlag.

Luczak, H., & Eversheim, W. (1999). *Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Berlin et al.: Springer-Verlag.

Ludwig, E., & Nyhuis, P. (1992). *Verbesserung der Termineinhaltung in komplexen Fertigungsbereichen durch einen neuen Ansatz zur Plandurlaufzeitermittlung*. In: Görke, W.; Rininsland, H.; Sybre, M. (Hrsg): *Information als Produktionsfaktor*. Berlin et al.: Springer, S. 473-483.

Nyhuis, P. (1991). *Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung*. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: Fortschr.-Ber. VDI, Reihe2, Nr 225.

Nyhuis, P., & H.-P.Wiendahl. (1999). *Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. Berlin: Springer Verlag.

Nyhuis.P., Begemann.C, Berkholz.D, & Hasenfuß.K. (2006). Konfiguration der Fertigungssteuerung. *wt Werkstattstechnik online* , S. 196-199.

Scheer, A.-W. (1990). *Der computergesteuerte Industriebetrieb*. Berlin: Springer.

Schomburg, E. (1980). *Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungeb an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau*. Dissertation RWTH Aachen.

Schuh, G. (2006). *Produktionsplanung und -steuerung*. Heidelberg: Springer Verlag.

---

VDI. (1992). *Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung/ VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB) u. AWF*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Wiendahl, H.-P. (1997). *Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.

Wiendahl, H.-P., Breithaupt, J.-W., & Hernández, R. (2000). Logistische Rationalisierungspotentiale mittels flexibler Kapazitäten erschließen. *wt Werkstattstechnik*, 144-148.

Wiendahl, H.-P. (1997). *Betriebsorganisation für Ingenieure 4. Aufl.* München: Hanser.

Wiendahl, H.-P. (2002). *Dissertation: Situative Konfiguration des Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld*. Stuttgart.

Wiendahl, H.-P. (1999). *Produktionsplanung und -steuerung: Aufgabenstellung und Zielkonflikte*. In: *Produktion und Management 4: Betrieb von Produktionssystemen/ Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.)*. Berlin u.a.: Springer.

Wildemann, H. (1998). *Marktführerschaft: Wege für ein profitables Unternehmenswachstum*. München: Transfer-Centrum GmbH.

Windt, K. (2001). *Engpassorientierte Fremdvergabe in Produktionsnetzen*. Diss. Uni Hannover 2000, veröffentlicht in: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 579*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Yu, K.-W. (2001). *Terminkennlinie - Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich*, Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag, Reihe 2.

Zahn, E., & Dillerup, R. (1994). *Fabrikstrategien und -strukturen im Wandel*. In: Zülch, G. (Hrsg.): *Vereinfachen und verkleinern -die neuen Strategien in der Produktion*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.



## 9 Anhang

### Tagesbelastung (Auftragszugang)

BKT	1966 Zugang [min]	1967 Zugang [min]	1968 Zugang [min]	8043 Zugang [min]	7705 Zugang [min]	8054 Zugang [min]
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0	201,50
2	0,00	0,00	0,00	86,40	44,6	369,30
3	0,00	410,00	166,00	86,40	68,6	473,50
4	0,00	410,00	166,00	143,40	248,6	530,50
5	0,00	820,00	166,00	457,75	248,6	616,50
6	0,00	820,00	166,00	517,95	266,6	779,50
7	0,00	1230,00	166,00	517,95	321,6	916,00
8	129,00	1314,80	547,80	890,87	321,6	992,40
9	129,00	1724,80	547,80	1033,87	321,6	1194,43
10	959,00	1724,80	1217,80	1115,87	321,6	1228,43
11	959,00	2634,80	1217,80	1115,87	392,6	1228,43
12	959,00	2634,80	1217,80	1115,87	392,6	1228,43
13	1577,40	2634,80	1571,80	1115,87	457,6	1228,43
14	1577,40	2634,80	1571,80	1115,87	607,2	1306,13
15	1577,40	2634,80	2347,80	1115,87	607,2	1306,13
16	1577,40	2634,80	2347,80	1115,87	777,2	1306,13
17	1577,40	2634,80	2347,80	1355,62	777,2	1363,93
18	1577,40	2634,80	2347,80	1355,62	849,2	1363,93
19	1838,40	3324,80	2347,80	1355,62	969,6	1363,93
20	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	1011,6	1363,93
21	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	969,6	1363,93
22	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	849,2	1363,93
23	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	777,2	1363,93
24	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	777,2	1363,93
25	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	607,2	1363,93
26	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	607,2	1363,93
27	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	457,6	1363,93
28	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	392,6	1363,93
29	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	392,6	1363,93
30	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1363,93
31	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1363,93
32	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1363,93
33	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1363,93
34	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	266,6	1363,93
35	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	248,6	1363,93
36	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	266,6	1363,93
37	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1363,93
38	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1363,93
39	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1363,93

BKT	1966 Zugang [min]	1967 Zugang [min]	1968 Zugang [min]	8043 Zugang [min]	7705 Zugang [min]	8054 Zugang [min]
40	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1363,93
41	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	392,6	1363,93
42	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	392,6	1363,93
43	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	457,6	1363,93
44	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	607,2	1363,93
45	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	607,2	1363,93
46	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	777,2	1363,93
47	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	777,2	1363,93
48	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	849,2	1363,93
49	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	969,6	1363,93
50	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	1011,6	1363,93
51	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	969,6	1363,93
52	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	849,2	1363,93
53	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	777,2	1363,93
54	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	777,2	1363,93
55	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	607,2	1363,93
56	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	607,2	1363,93
57	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	457,6	1363,93
58	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	392,6	1363,93
59	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	392,6	1363,93
60	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1363,93
61	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1363,93
62	2298,40	3324,80	2687,80	1355,62	321,6	1162,43
63	2298,40	3324,80	2687,80	1269,22	321,6	994,63
64	2298,40	2914,80	2521,80	1269,22	266,6	890,43
65	2298,40	2914,80	2521,80	1212,22	248,6	833,43
66	2298,40	2504,80	2521,80	897,87	248,6	747,43
67	2298,40	2504,80	2521,80	837,67	68,6	584,43
68	2298,40	2094,80	2521,80	837,67	0,00	447,93
69	2169,40	2010,00	2140,00	464,75	0,00	371,53
70	2169,40	1600,00	2140,00	321,75	0,00	169,50
71	1339,40	1600,00	1470,00	239,75	0,00	135,50
72	1339,40	690,00	1470,00	239,75	0,00	135,50
73	1339,40	690,00	1470,00	239,75	0,00	135,50
74	721,00	690,00	1116,00	239,75	0,00	135,50
75	721,00	690,00	1116,00	239,75	0,00	57,80
76	721,00	690,00	340,00	239,75	0,00	57,80
77	721,00	690,00	340,00	239,75	0,00	57,80
78	721,00	690,00	340,00	0,00	0,00	0,00
79	721,00	690,00	340,00	0,00	0,00	0,00
80	460,00	0,00	340,00	0,00	0,00	0,00
81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 16: Tagesbelastung (tägl. Auftragszugang)

### Tagesbelastungsabgleich mit verfügbarer Kapazität

BKT	1966 anfall. Arbeit [min]	1967 anfall. Arbeit [min]	1968 anfall. Arbeit [min]	7705 anfall. Arbeit [min]	8043 anfall. Arbeit [min]	8054 anfall. Arbeit [min]
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	201,50
2	0,00	0,00	0,00	44,60	86,40	369,30
3	0,00	410,00	166,00	68,60	86,40	473,50
4	0,00	410,00	166,00	248,60	143,40	530,50
5	0,00	820,00	166,00	248,60	457,75	616,50
6	0,00	820,00	166,00	266,60	517,95	779,50
7	0,00	1230,00	166,00	321,60	517,95	916,00
8	129,00	1314,80	547,80	321,60	890,87	992,40
9	129,00	1724,80	547,80	321,60	1033,87	1226,83
10	959,00	1724,80	1217,80	321,60	1189,74	1495,27
11	959,00	2634,80	1217,80	392,60	1345,61	1763,70
12	959,00	2634,80	1217,80	392,60	1501,48	2032,13
13	1577,40	2634,80	1571,80	457,60	1657,35	2300,56
14	1577,40	2634,80	1571,80	543,60	1813,22	2646,69
15	1577,40	2634,80	2347,80	543,60	1969,09	2992,82
16	1577,40	2634,80	2347,80	628,60	2124,96	3338,96
17	1577,40	2634,80	2347,80	628,60	2520,58	3742,89
18	1577,40	2634,80	2347,80	664,60	2916,20	4146,82
19	1838,40	3324,80	2347,80	724,80	3311,82	4550,75
20	2298,40	3769,60	2687,80	745,80	3707,44	4954,68
21	2676,80	4214,40	2687,80	724,80	4103,06	5358,61
22	3055,20	4659,20	2687,80	664,60	4498,68	5762,55
23	3433,60	5104,00	2687,80	628,60	4894,30	6166,48
24	3812,00	5548,80	2687,80	628,60	5289,92	6570,41
25	4190,40	5993,60	2687,80	543,60	5685,54	6974,34
26	4568,80	6438,40	2687,80	543,60	6081,16	7378,27
27	4947,20	6883,20	2687,80	457,60	6476,78	7782,20
28	5325,60	7328,00	2687,80	392,60	6872,40	8186,13
29	5704,00	7772,80	2687,80	392,60	7268,02	8590,07
30	6082,40	8217,60	2687,80	321,60	7663,64	8994,00
31	6460,80	8662,40	2687,80	321,60	8059,26	9397,93
32	6839,20	9107,20	2687,80	321,60	8454,88	9801,86
33	7217,60	9552,00	2687,80	321,60	8850,50	10205,79
34	7596,00	9996,80	2687,80	266,60	9246,12	10609,72
35	7974,40	10441,60	2687,80	248,60	9641,74	11013,66
36	8352,80	10886,40	2687,80	266,60	10037,36	11417,59
37	8731,20	11331,20	2687,80	321,60	10432,98	11821,52
38	9109,60	11776,00	2687,80	321,60	10828,60	12225,45
39	9488,00	12220,80	2687,80	321,60	11224,22	12629,38
40	9866,40	12665,60	2687,80	321,60	11619,84	13033,31
41	10244,80	13110,40	2687,80	392,60	12015,46	13437,24
42	10623,20	13555,20	2687,80	392,60	12411,08	13841,18

BKT	1961 anfall. Arbeit [min]	1962 anfall. Arbeit [min]	1963 anfall. Arbeit [min]	7700 anfall. Arbeit [min]	8038 anfall. Arbeit [min]	8049 anfall. Arbeit [min]
43	11001,60	14000,00	2687,80	457,60	12806,70	14245,11
44	11380,00	14444,80	2687,80	543,60	13202,32	14649,04
45	11758,40	14889,60	2687,80	543,60	13597,94	15052,97
46	12136,80	15334,40	2687,80	628,60	13993,56	15456,90
47	12515,20	15779,20	2687,80	628,60	14389,18	15860,83
48	12893,60	16224,00	2687,80	664,60	14784,80	16264,77
49	13272,00	16668,80	2687,80	724,80	15180,42	16668,70
50	13650,40	17113,60	2687,80	745,80	15576,04	17072,63
51	14028,80	17558,40	2687,80	724,80	15971,66	17476,56
52	14407,20	18003,20	2687,80	664,60	16367,28	17880,49
53	14785,60	18448,00	2687,80	628,60	16762,90	18284,42
54	15164,00	18892,80	2687,80	628,60	17158,52	18688,36
55	15542,40	19337,60	2687,80	543,60	17554,14	19092,29
56	15920,80	19782,40	2687,80	543,60	17949,76	19496,22
57	16299,20	20227,20	2687,80	457,60	18345,38	19900,15
58	16677,60	20672,00	2687,80	392,60	18741,00	20304,08
59	17056,00	21116,80	2687,80	392,60	19136,62	20708,01
60	17434,40	21561,60	2687,80	321,60	19532,24	21111,94
61	17812,80	22006,40	2687,80	321,60	19927,86	21515,88
62	18191,20	22451,20	2687,80	321,60	20323,48	21718,31
63	18569,60	22896,00	2687,80	321,60	20632,70	21752,94
64	18948,00	22930,80	2521,80	266,60	20941,92	21683,37
65	19326,40	22965,60	2521,80	248,60	21194,14	21556,80
66	19704,80	22590,40	2521,80	248,60	21132,01	21344,23
67	20083,20	22215,20	2521,80	68,60	21009,68	20968,65
68	20461,60	21430,00	2521,80	0,00	20887,35	20456,58
69	20711,00	20560,00	2140,00	0,00	20392,10	19868,11
70	20960,40	19280,00	2140,00	0,00	19753,85	19077,61
71	20379,80	18000,00	1470,00	0,00	19033,60	18253,11
72	19799,20	15810,00	1470,00	0,00	18313,35	17428,61
73	19218,60	13620,00	1470,00	0,00	17593,10	16604,11
74	18019,60	11430,00	1116,00	0,00	16872,85	15779,61
75	16820,60	9240,00	1116,00	0,00	16152,60	14877,41
76	15621,60	7050,00	340,00	0,00	15432,35	13975,21
77	14422,60	4860,00	340,00	0,00	14712,10	13073,01
78	13223,60	2670,00	340,00	0,00	13752,10	12113,01
79	12024,60	690,00	340,00	0,00	12792,10	11153,01
80	10564,60	0,00	340,00	0,00	11832,10	10193,01
81	8644,60	0,00	0,00	0,00	10872,10	9233,01
82	6724,60	0,00	0,00	0,00	9912,10	8273,01
83	4804,60	0,00	0,00	0,00	8952,10	7313,01
84	2884,60	0,00	0,00	0,00	7992,10	6353,01
85	964,60	0,00	0,00	0,00	7032,10	5393,01

BKT	1961 anfall. Arbeit [min]	1962 anfall. Arbeit [min]	1963 anfall. Arbeit [min]	7700 anfall. Arbeit [min]	8038 anfall. Arbeit [min]	8049 anfall. Arbeit [min]
86	0,00	0,00	0,00	0,00	6072,10	4433,01
87	0,00	0,00	0,00	0,00	5112,10	3473,01
88	0,00	0,00	0,00	0,00	4152,10	2513,01
89	0,00	0,00	0,00	0,00	3192,10	1553,01
90	0,00	0,00	0,00	0,00	2232,10	593,01
91	0,00	0,00	0,00	0,00	1272,10	0,00
92	0,00	0,00	0,00	0,00	312,10	0,00
...	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 17: Belastungsabgleich mit verfügbarer Kapazität

## Reichweitenberechnung

BKT	1966 RW [BKT]	1967 RW [BKT]	1968 RW [BKT]	8043 RW [BKT]	8054 RW [BKT]	7705 RW [BKT]
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,08	0,28	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,24	0,56	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,40	0,84	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,56	1,12	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,73	1,40	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,89	1,76	1,13
15	0,00	0,00	0,00	1,05	2,12	1,13
16	0,00	0,00	0,00	1,21	2,48	1,31
17	0,00	0,00	0,00	1,63	2,90	1,31
18	0,00	0,00	0,00	2,04	3,32	1,38
19	0,00	0,15	0,00	2,45	3,74	1,51
20	0,20	0,31	0,00	2,86	4,16	1,55
21	0,39	0,46	0,00	3,27	4,58	1,51
22	0,59	0,62	0,00	3,69	5,00	1,38
23	0,79	0,77	0,00	4,10	5,42	1,31
24	0,99	0,93	0,00	4,51	5,84	1,31
25	1,18	1,08	0,00	4,92	6,26	1,13
26	1,38	1,24	0,00	5,33	6,69	1,13
27	1,58	1,39	0,00	5,75	7,11	0,00
28	1,77	1,54	0,00	6,16	7,53	0,00

BKT	1966 RW [BKT]	1967 RW [BKT]	1968 RW [BKT]	8043 RW [BKT]	8054 RW [BKT]	7705 RW [BKT]
29	1,97	1,70	0,00	6,57	7,95	0,00
30	2,17	1,85	0,00	6,98	8,37	0,00
31	2,37	2,01	0,00	7,40	8,79	0,00
32	2,56	2,16	0,00	7,81	9,21	0,00
33	2,76	2,32	0,00	8,22	9,63	0,00
34	2,96	2,47	0,00	8,63	10,05	0,00
35	3,15	2,63	0,00	9,04	10,47	0,00
36	3,35	2,78	0,00	9,46	10,89	0,00
37	3,55	2,93	0,00	9,87	11,31	0,00
38	3,74	3,09	0,00	10,28	11,73	0,00
39	3,94	3,24	0,00	10,69	12,16	0,00
40	4,14	3,40	0,00	11,10	12,58	0,00
41	4,34	3,55	0,00	11,52	13,00	0,00
42	4,53	3,71	0,00	11,93	13,42	0,00
43	4,73	3,86	0,00	12,34	13,84	0,00
44	4,93	4,02	0,00	12,75	14,26	1,13
45	5,12	4,17	0,00	13,16	14,68	1,13
46	5,32	4,32	0,00	13,58	15,10	1,31
47	5,52	4,48	0,00	13,99	15,52	1,31
48	5,72	4,63	0,00	14,40	15,94	1,38
49	5,91	4,79	0,00	14,81	16,36	1,51
50	6,11	4,94	0,00	15,23	16,78	1,55
51	6,31	5,10	0,00	15,64	17,20	1,51
52	6,50	5,25	0,00	16,05	17,63	1,38
53	6,70	5,41	0,00	16,46	18,05	1,31
54	6,90	5,56	0,00	16,87	18,47	1,31
55	7,09	5,71	0,00	17,29	18,89	1,13
56	7,29	5,87	0,00	17,70	19,31	1,13
57	7,49	6,02	0,00	18,11	19,73	0,00
58	7,69	6,18	0,00	18,52	20,15	0,00
59	7,88	6,33	0,00	18,93	20,57	0,00
60	8,08	6,49	0,00	19,35	20,99	0,00
61	8,28	6,64	0,00	19,76	21,41	0,00
62	8,47	6,80	0,00	20,17	21,62	0,00
63	8,67	6,95	0,00	20,49	21,66	0,00
64	8,87	6,96	0,00	20,81	21,59	0,00
65	9,07	6,97	0,00	21,08	21,45	0,00
66	9,26	6,84	0,00	21,01	21,23	0,00
67	9,46	6,71	0,00	20,89	20,84	0,00
68	9,66	6,44	0,00	20,76	20,31	0,00
69	9,79	6,14	0,00	20,24	19,70	0,00
70	9,92	5,69	0,00	19,58	18,87	0,00
71	9,61	5,25	0,00	18,83	18,01	0,00

BKT	1966 RW [BKT]	1967 RW [BKT]	1968 RW [BKT]	8043 RW [BKT]	8054 RW [BKT]	7705 RW [BKT]
72	9,31	4,49	0,00	18,08	17,15	0,00
73	9,01	3,73	0,00	17,33	16,30	0,00
74	8,39	2,97	0,00	16,58	15,44	0,00
75	7,76	2,21	0,00	15,83	14,50	0,00
76	7,14	1,45	0,00	15,08	13,56	0,00
77	6,51	0,69	0,00	14,33	12,62	0,00
78	5,89	0,00	0,00	13,33	11,62	0,00
79	5,26	0,00	0,00	12,33	10,62	0,00
80	4,50	0,00	0,00	11,33	9,62	0,00
81	3,50	0,00	0,00	10,33	8,62	0,00
82	2,50	0,00	0,00	9,33	7,62	0,00
83	1,50	0,00	0,00	8,33	6,62	0,00
84	0,50	0,00	0,00	7,33	5,62	0,00
85	0,00	0,00	0,00	6,33	4,62	0,00
86	0,00	0,00	0,00	5,33	3,62	0,00
87	0,00	0,00	0,00	4,33	2,62	0,00
88	0,00	0,00	0,00	3,33	1,62	0,00
89	0,00	0,00	0,00	2,33	0,62	0,00
90	0,00	0,00	0,00	1,33	0,00	0,00
91	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00

**Tabelle 18: Berechnung Reichweite Engpassysteme**