

# **Produktionslosgrößen und logistische Kennlinien in der Hybridfertigung**

**Ein Konzept zur Bestimmung des Einflusses der Pro-  
duktionslosgröße und Reihenfolge auf logistische  
Zielgrößen am Beispiel einer Hybridfertigung**

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Stefanie VOLLAND, BSc

eingereicht am Lehrstuhl für Industrielogistik

an der Montanuniversität Leoben

Leoben, im Oktober 2012

## **Eidesstattliche Erklärung**

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

Dipl.-Ing. Stefanie Volland, BSc

Leoben, im Oktober 2012

## Danksagung

Zunächst möchte ich mich beim Betreuer meiner Dissertation, Herrn **Univ.-Prof. Mag. Dr. Helmut E. Zsifkovits**, Leiter des Lehrstuhls Industrielogistik, für die Möglichkeit der Verfassung dieser Arbeit, seine Anregungen sowie für seinen fachlichen Input bedanken.

Ebenso danke ich **Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c. mult. Michael Schenk** für die Übernahme der Zweitbetreuung meiner Dissertation.

Besonderer Dank gilt auch Herrn **Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Norbert Seiffer** für seine Unterstützung, die Bereitschaft für fachliche Diskussionen sowie seine wertvollen mathematischen Inputs, welche wesentlich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Danken möchte ich auch meinen **Arbeitskollegen** für ihre hilfreichen Tipps und Feedbacks, ihr Verständnis und die Unterstützung, die ich während der Entstehung dieser Arbeit erhalten habe.

Des Weiteren danke ich meinem **Industriepartner** und den dort **verantwortlichen Personen**, insbesondere dem **Betriebsleiter der Gießerei und Platzbetriebe** der Kupferhütte, für die konstruktive Zusammenarbeit.

Mein größter Dank jedoch gilt all jenen Menschen, die mich privat auf diesem Weg begleitet, unterstützt und ermutigt haben. Gewidmet ist diese Arbeit meinem Vater.

## Kurzfassung

Die Auslegung der Produktion nach den Bedürfnissen der Kunden, um die steigende Anzahl individueller Nachfragen erfüllen und damit die Wettbewerbsfähigkeit durch Differenzierung gegenüber der Konkurrenz sicherstellen zu können, liegt neben der Realisierung einer wirtschaftlichen Produktion im Fokus produzierender Unternehmen. Die Tatsache, dass durch die geeignete Bestimmung der Produktionslosgröße und Reihenfolge neben der Wirtschaftlichkeit auch die logistische Leistungsfähigkeit eines Systems positiv beeinflusst werden kann, konnte bzw. wurde bis dato kaum bewertet. An dieser Stelle setzt die vorliegende Dissertation an. Das Ziel dieser Arbeit stellt die Entwicklung von Modellen zur Abbildung und Bewertung des Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf die Logistikkosten und Logistikleistung eines Produktionssystems sowie die Ableitung eines Vorgehenskonzepts, welches die positive Abstimmung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf logistische Kennlinien und den darin abgebildeten Zielgrößen ermöglicht, dar. Zudem liegt der Fokus auf hybriden Produktionssystemen, welche die Schnittstelle zwischen der Prozess- und Fertigungsindustrie bilden und den Übergang des Prozessablaufs von der Stoffumwandlung zur Stoffumformung beinhalten und in der logistischen Disziplin als wenig erforschtes Gebiet gelten. Zur Beantwortung der wissenschaftlichen Fragestellung wird ein Bewertungsinstrumentarium entwickelt, mit Hilfe dessen der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge sowie deren Auswirkungen auf die bestehenden Ansätze der Kennlinientheorie übertragen werden können, wodurch der Einfluss auf die logistischen Zielgrößen dargestellt und bewertet werden kann. Ebenso wird in dieser Arbeit ein anderer Ansatz zur Beschreibung logistischer Kennlinien vorgestellt, welcher eine bessere und einfachere Anpassung berechneter Kennlinien an reale Gegebenheiten im Vergleich zu dem von Nyhuis und Wiendahl verwendeten verspricht. Einen weiteren Schwerpunkt dieser Arbeit bildet das entwickelte 3-Phasen-Konzept, welches bei der Bestimmung der Produktionslosgröße und Reihenfolge kostenspezifische Aspekte als auch produktionslogistische Zielsetzungen gleichermaßen berücksichtigt. Durch die Anwendung des im Vorgehenskonzept enthaltenen Abstimmungsalgorithmus kann eine Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Abstimmung zwischen der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung und der Logistikleistung und -kosten einer hybriden Fertigung erzielt werden. Die Verifizierung und Validierung der entwickelten Modelle und Vorgehensweise erfolgt im Zuge der Implementierung in einer Kupferhütte.

## Abstract

The focus of manufacturing companies is put on the realization of economic production alongside with designing their production according to customers' needs, which helps to meet the rising number of individual requests and therefore ensures competitiveness through differentiation from the competition. The fact, that the appropriate determination of production lot size and sequence has positive impact not only on the cost effectiveness but also on the logistical performance of a system, has received insufficient attention in business practice to date. However, it should be noted that the importance of lot size and sequence determination has greatly increased in recent years and therefore this dissertation has been created.

The aim of this thesis is to develop models for mapping and evaluating the influence of production lot size and sequence on logistics costs and performance of a production system alongside with the derivation of a procedural concept, which allows identification of the influence of production lot size and sequence on Logistic Operating Curves and the target figures mapped in them. The focus is also put on hybrid production systems, which form the interface between the process and manufacturing industries and which include both processes of material reshaping and transformation. Hybrid production systems are considered to be a field of research that has not been studied thoroughly concerning logistics yet. In order to answer the research question, an assessment tool is developed with the help of which the impact of different production lot sizes and sequences on Logistic Operating Curves can be shown and evaluated. Similarly, a new basic function for describing Logistic Operating Curves is developed which allows a better and easier fit to real conditions in comparison using that by Nyhuis and Wiendahl. Furthermore a 3-step-approach is presented which takes not only cost specific aspects but also takes logistics objectives into consideration, while determining the production lot size and sequence. Decision support is provided through application of the in the concept contained balancing algorithm. It facilitates the coordination between lot size and sequence planning, and also between logistics performance and costs of hybrid manufacturing. The verification and validation of the developed models and procedures are achieved in the course of the implementation in a copper mill.

# Inhaltsverzeichnis

|   |            |
|---|------------|
| <b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....  | <b>I</b>   |
| <b>Danksagung</b> .....   | <b>II</b>  |
| <b>Kurzfassung</b> .....  | <b>III</b> |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>IV</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis</b> .....   | <b>V</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> .....  | <b>IX</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....  | <b>X</b>   |
| <b>1 Einführung</b> .....   | <b>1</b>   |
| 1.1 Ausgangssituation .....   | 1          |
| 1.2 Struktur der Dissertationsschrift .....   | 3          |
| <b>2 Ableitung der wissenschaftlichen Fragestellung und des Forschungsdesigns</b> .....                   | <b>6</b>   |
| 2.1 Grundbegriffe .....   | 6          |
| 2.2 Stand der wissenschaftlichen Diskussion.....  | 9          |
| 2.2.1 Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Prozess- und<br>Fertigungsindustrie ..... | 9          |
| 2.2.2 Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in hybriden<br>Produktionssystemen .....         | 24         |
| 2.2.3 Losgrößereinfluss auf logistische Kennlinien .....  | 28         |
| 2.3 Forschungslücke .....   | 32         |
| 2.4 Relevanz der Thematik für die betriebliche Praxis.....  | 34         |
| 2.5 Forschungsfragen und Zielsetzungen der Arbeit .....   | 37         |
| 2.6 Forschungsdesign.....   | 38         |
| 2.6.1 Darstellung der Vorgehensweise .....  | 38         |
| 2.6.2 Qualitative Datenerhebung .....   | 39         |
| 2.6.3 Quantitative Datenauswertung.....   | 40         |
| <b>3 Wissenschaftstheoretische Grundlagen</b> .....   | <b>42</b>  |
| 3.1 Hybride Produktionssysteme - Schnittstelle zwischen kontinuierlicher und diskreter Fertigung ..       | 42         |
| 3.2 Hybride Produktionssysteme .....  | 45         |
| 3.2.1 Grundlagen der Produktionslogistik.....   | 45         |
| 3.2.2 Systemtheorie .....   | 47         |
| 3.2.2.1 Grundlagen und Merkmale von Systemen .....  | 48         |
| 3.2.2.2 Systemtheoretische Betrachtungsweisen .....   | 49         |
| 3.2.3 Kybernetische Grundprinzipien .....   | 51         |
| 3.2.3.1 Anwendung kybernetischer Grundprinzipien in Produktionssystemen .....                             | 51         |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 3.2.4     | Charakterisierung von Produktionssystemen mit Hybridfertigung .....   | 54         |
| 3.2.5     | Herausforderungen an Produktionssysteme mit Hybridfertigung .....   | 60         |
| 3.3       | Kennlinientheorie.....  | 62         |
| 3.3.1     | Grundlagen zu logistischen Kennlinien .....   | 64         |
| 3.3.2     | Wirkungszusammenhänge logistischer Zielgrößen .....   | 67         |
| 3.3.3     | Anwendungsmöglichkeiten von Produktionskennlinien im Rahmen der Modellierung  | 69         |
| 3.3.3.1   | Bestehende Ansätze der Kennlinienmodellierung .....   | 72         |
| 3.3.3.1.1 | Entwicklung einer Basisgleichung zur Darstellung berechneter Kennlinien .....   | 80         |
| 3.3.3.2   | Beurteilung der Anwendbarkeit von Produktionskennlinien in hybriden<br>Produktionssystemen .....  | 85         |
| 3.4       | Losgrößen- und Reihenfolgeplanung.....  | 86         |
| 3.4.1     | Einführung in die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung .....   | 86         |
| 3.4.2     | Modelle und Verfahren zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung in hybriden<br>Produktionssystemen .....  | 88         |
| 3.4.2.1   | Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsrestriktionen .....  | 92         |
| 3.4.2.1.1 | Mehrstufiges Losgrößenproblem mit beschränkten Kapazitäten und<br>reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten und -kosten (MLCLSD) .....               | 96         |
| 3.4.2.2   | Algorithmische Lösungsansätze für mehrstufige, dynamische Losgrößenmodelle mit<br>Kapazitätsrestriktionen.....                              | 101        |
| 3.4.2.3   | Durchlauforientiertes Verfahren der Losgrößenbestimmung .....   | 106        |
| 3.4.3     | Beurteilung der Anwendbarkeit der vorgestellten Losgrößenverfahren .....  | 109        |
| 3.5       | Modellierung logistischer Systeme .....   | 111        |
| 3.5.1     | Begriffe und Grundlagen der Modellierung .....  | 111        |
| 3.5.1.1   | Der Modellbegriff .....   | 111        |
| 3.5.1.2   | Entwicklung von Modellen .....  | 113        |
| 3.5.1.3   | Arten von Modellen .....  | 121        |
| 3.5.1.4   | Grenzen der Modellierung.....   | 125        |
| 3.5.1.5   | Nutzen der Modellierung in der Planung und Steuerung von logistischen Systemen .....  | 127        |
| 3.5.2     | Anforderungen an die Modellierung zur Bestimmung des Einflusses der<br>Produktionslosgröße und Reihenfolge auf logistische Zielgrößen ..... | 129        |
| 3.5.3     | Simulation von Produktionssystemen .....  | 132        |
| 3.5.3.1   | Grundlagen zur Simulation von Produktionssystemen .....   | 133        |
| 3.5.3.2   | Methodische, konzeptuelle und stochastische Sachzusammenhänge im Zuge der<br>Erstellung von Simulationsmodellen .....                       | 135        |
| 3.5.3.3   | Vorgehensweise im Zuge der Simulationserstellung .....  | 139        |
| 3.6       | Zusammenfassung .....   | 143        |
| <b>4</b>  | <b>Modellierung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge in hybriden<br/>Produktionssystemen.....</b>                         | <b>145</b> |
| 4.1       | Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von hybriden Produktionssystemen.....   | 145        |
| 4.1.1     | Zielgrößen der Logistikleistung .....   | 149        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.1.2     | Zielgrößen der Logistikkosten .....  | 154        |
| 4.2       | Auswirkungen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl auf die Logistikleistung und die Logistikkosten einer hybriden Produktion .....                 | 159        |
| 4.2.1     | Produktionslosgrößen in hybriden Produktionssystemen .....   | 160        |
| 4.2.2     | Bewertungsparameter zur Bestimmung des Losgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf die Logistikleistung.....  | 164        |
| 4.2.3     | Bewertungsparameter zur Bestimmung des Losgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf die Logistikkosten .....   | 168        |
| 4.2.4     | Ableitung des Bewertungsinstrumentariums .....   | 172        |
| 4.2.5     | Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss in hybriden Produktionssystemen .....  | 175        |
| 4.3       | Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf logistische Kennlinien .....   | 179        |
| 4.3.1     | Darstellung des Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf logistische Kennlinienverläufe.....  | 179        |
| 4.3.2     | Kennlinienverläufe hybrider Produktionssysteme unter Berücksichtigung der Produktionslosgröße und Reihenfolge .....  | 186        |
| 4.4       | Vorgehenskonzept zur Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem ..... | 193        |
| 4.4.1     | Abstimmungsprozess der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen .....   | 197        |
| 4.5       | Anwendungsmöglichkeiten und Restriktionen .....  | 202        |
| 4.6       | Zusammenfassung und Überleitung .....  | 203        |
| <b>5</b>  | <b>Konkretisierung am Beispiel einer Kupferhütte .....</b>   | <b>205</b> |
| 5.1       | Abgrenzung und strukturierte Betrachtung des Produktionssystems .....  | 205        |
| 5.1.1     | Das Subsystem „Gießerei“ .....   | 207        |
| 5.2       | Analyse der Ausgangssituation und Zielformulierung .....   | 208        |
| 5.2.1     | Ausgangssituation.....   | 209        |
| 5.2.2     | Zielsetzungen .....  | 210        |
| 5.3       | Implementierung des Vorgehenskonzeptes .....   | 211        |
| 5.3.1     | Erstellung des Simulationsmodells .....  | 211        |
| 5.3.1.1   | Vorstellung der verwendeten Simulationssoftware .....  | 211        |
| 5.3.1.2   | Schnittstellen mittels VBA-Skripten .....  | 214        |
| 5.3.1.3   | Struktur und Aufbau des Simulationsmodells.....  | 215        |
| 5.3.1.3.1 | Vorgehensweise zur Ermittlung der logistischen Zielgrößen.....   | 215        |
| 5.3.1.3.2 | VBA-Skript zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung.....  | 216        |
| 5.3.1.3.3 | Simulationsmodell Gießerei .....   | 222        |
| 5.3.2     | Testläufe.....   | 224        |
| 5.3.3     | Umsetzung der Abstimmung und Bewertung.....  | 225        |
| 5.3.3.1.1 | Abstimmungsprozess des 3-Phasen-Konzepts .....   | 226        |
| 5.3.3.1.2 | Bewertungsinstrumentarium .....  | 236        |
| 5.3.4     | Simulationsergebnisse .....  | 238        |



|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.4      | Erkenntnisse und Schlussfolgerungen .....                                     | 242        |
| 5.4.1    | Ergebnis der Verifizierung und Validierung der Modelle .....                  | 243        |
| 5.4.1.1  | Wirkungskontrolle des Abstimmungsinstrumentariums .....                       | 243        |
| 5.4.1.2  | Beurteilung des Bewertungsinstrumentariums.....                               | 246        |
| 5.4.2    | Überprüfung der Basisgleichung zur Beschreibung logistischer Kennlinien ..... | 250        |
| 5.4.3    | Beurteilung der Adaptierbarkeit der Modelle .....                             | 256        |
| <b>6</b> | <b>Abschließende Betrachtungen und Resümee .....</b>                          | <b>259</b> |
| 6.1      | Zusammenfassung .....   | 259        |
| 6.2      | Ausblick .....  | 260        |
|          | <b>Literaturverzeichnis.....</b>  | <b>262</b> |
|          | <b>Anhang A.....</b>  | <b>280</b> |
|          | <b>Anhang B.....</b>  | <b>281</b> |
|          | <b>Anhang C.....</b>  | <b>287</b> |
|          | <b>Anhang D.....</b>  | <b>292</b> |
|          | <b>Anhang E.....</b>  | <b>296</b> |
|          | <b>Anhang F.....</b>  | <b>299</b> |

## Tabellenverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 1: Übersicht deutschsprachige Artikel .....   | 15  |
| Tabelle 2: Übersicht Dissertationen I.....  | 16  |
| Tabelle 3: Auswertung deutschsprachige Artikel nach Zielgröße und Lösungsverfahren .....  | 17  |
| Tabelle 4: Auswertung Dissertationen nach Zielgröße und Lösungsverfahren.....   | 18  |
| Tabelle 5: Auszug englischsprachige Artikel I - Teil 1 .....  | 20  |
| Tabelle 6: Auszug englischsprachige Artikel I - Teil 2.....   | 21  |
| Tabelle 7: Auswertung englischsprachige Artikel nach Zielgröße und Lösungsverfahren -1 .....  | 22  |
| Tabelle 8: Auswertung englischsprachige Artikel nach Zielgröße und Lösungsverfahren - 2.....  | 23  |
| Tabelle 9: Übersicht englischsprachige Artikel.....   | 27  |
| Tabelle 10: Übersicht Dissertationen II.....  | 31  |
| Tabelle 11: Auszug englischsprachige Artikel II.....  | 31  |
| Tabelle 12: Auflistung - Problematiken in betrieblicher Praxis.....   | 35  |
| Tabelle 13: Überblick - einstufige dynamische Losgrößenverfahren.....   | 93  |
| Tabelle 14: exemplarische Berechnung des Einflusses unterschiedlicher Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternativen auf die Termintreue ..... | 174 |
| Tabelle 15: Durchmesser Kriterien für Rinneinduktionsöfen 1-4.....  | 220 |
| Tabelle 16: Auswertung der Literatur hinsichtlich Einflussfaktoren in hybriden Produktionssystemen .....  | 292 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Trends und Tendenzen in der Produktion und deren Folgen .....                       | 2  |
| Abbildung 2: Struktur der Dissertationsschrift .....   | 5  |
| Abbildung 3: in quantitative Literaturanalyse aufgenommene Journals .....                        | 10 |
| Abbildung 4: Suchbegriffe der quantitativen Analyse .....  | 10 |
| Abbildung 5: englischsprachige Veröffentlichungen im Vergleich I .....                           | 11 |
| Abbildung 6: englischsprachige Veröffentlichungen im Vergleich II .....                          | 11 |
| Abbildung 7: englischsprachige Veröffentlichungen - Fachbereich .....                            | 12 |
| Abbildung 8: englischsprachige Veröffentlichungen - Vergleich der Zielgrößen .....               | 13 |
| Abbildung 9: Dissertationen nach Fachbereich und Industrie .....                                 | 14 |
| Abbildung 10: Suchbegriffe - zweiter Teil der Literaturstudie .....                              | 25 |
| Abbildung 11: Maschinenbelegungs- und Chargenplanung bzw. -optimierung in der Hybridfertigung... | 26 |
| Abbildung 12: Auswertung Expertenbefragung .....   | 36 |
| Abbildung 13: Produktionsstruktur einer Gießerei .....   | 43 |
| Abbildung 14: Das Produktionssystem .....  | 46 |
| Abbildung 15: Grundbegriffe der Systemtheorie .....  | 48 |
| Abbildung 16: Strukturorientierte Betrachtungsweise .....  | 51 |
| Abbildung 17: Wirkungsprinzip einer Steuerung .....  | 52 |
| Abbildung 18: Funktionsschema des Regelkreises .....   | 53 |
| Abbildung 19: schematische Darstellung der Schnittstelle Hybridfertigung .....                   | 55 |
| Abbildung 20: Produktionssystem mit Hybridfertigung .....  | 59 |
| Abbildung 21: Definition des Durchlaufelements .....   | 64 |
| Abbildung 22: Trichtermodell und Durchlaufdiagramm .....   | 65 |
| Abbildung 23: Betriebszustände und Produktionskennlinien eines Arbeitssystems .....              | 67 |
| Abbildung 24: Zusammenhang Lagerbestand und Durchlaufzeit .....                                  | 68 |
| Abbildung 25: Visualisierung des Dilemmas der Ablaufplanung mit Produktionskennlinien .....      | 69 |
| Abbildung 26: Ideales Durchlaufdiagramm und ideale Produktionskennlinie .....                    | 71 |
| Abbildung 27: Basismodell zur Parameterberechnung von Produktionskennlinien .....                | 72 |
| Abbildung 28: Schritte der affinen Transformation .....  | 73 |
| Abbildung 29: Definition Abknickpunkt (nach Nyhuis und Wiendahl) .....                           | 74 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 30: transformierende Winkelhalbierende .....  | 75  |
| Abbildung 31: berechnete Kennlinien bei Variation der Funktionsparameter .....  | 76  |
| Abbildung 32: Bezier-Kurven als Basisgleichung für Kennlinien .....   | 81  |
| Abbildung 33: Basisfunktionen im Vergleich .....  | 82  |
| Abbildung 34: gestreckte Kennlinien im Vergleich .....  | 83  |
| Abbildung 35: schematische Darstellung einer mehrstufigen Produktion .....  | 88  |
| Abbildung 36: Abgrenzung der für diese Arbeit relevanten Losgrößenmodelle .....   | 90  |
| Abbildung 37: mehrstufige Losgrößenmodelle mit Kapazitätsrestriktionen .....  | 93  |
| Abbildung 38: Klassifizierung der Lösungsansätze für mehrstufige dynamische Losgrößenprobleme mit<br>Kapazitätsrestriktionen..... | 101 |
| Abbildung 39: MP-basierte Verfahren .....   | 102 |
| Abbildung 40: Metaheuristiken .....   | 104 |
| Abbildung 41: Dekompositions-/Aggregationsverfahren .....   | 105 |
| Abbildung 42: Lagrange-Heuristiken .....  | 105 |
| Abbildung 43: Problemspezifische Greedy-Verfahren .....   | 106 |
| Abbildung 44: Prinzip der Durchlauforientierten Losgrößenbestimmung .....   | 107 |
| Abbildung 45: Harmonisierung der Auftragszeiten durch DOLOS-Verfahren .....   | 109 |
| Abbildung 46: Modell als abstrahierte Abbildung eines Systems .....   | 112 |
| Abbildung 47: Schritte der Modellbildung .....  | 116 |
| Abbildung 48: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung (GoM) .....   | 117 |
| Abbildung 49: Schritte der qualitativen Modellierung von Systemen .....   | 119 |
| Abbildung 50: Zielsetzungen der zu entwickelnden Modelle .....  | 131 |
| Abbildung 51: Anforderungen an die zu entwickelnden Modelle .....   | 132 |
| Abbildung 52: Ziele des Simulationseinsatzes in der Produktion .....  | 134 |
| Abbildung 53: Einordnung der Simulation in die Klassifikation von Modellen .....  | 137 |
| Abbildung 54: Vorgehensweise im Zuge der Simulationserstellung .....  | 140 |
| Abbildung 55: Zusammenfassung der Charakteristika eines hybriden Produktionssystems .....   | 143 |
| Abbildung 56: Zielsystem der Produktionslogistik .....  | 146 |
| Abbildung 57: Logistikziele eines Produktionssystems .....  | 148 |
| Abbildung 58: Zielgrößen der Logistikleistung eines hybriden Produktionssystems .....   | 149 |
| Abbildung 59: Komponenten der Durchlaufzeit nach REFA-Schema.....   | 151 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 60: Zielgrößen der Logistikkosten eines hybriden Produktionssystems .....  | 154 |
| Abbildung 61: degressiver Fixkostenverlauf bei zunehmendem Beschäftigungsgrad .....  | 155 |
| Abbildung 62: Leer- und Nutzkosten .....   | 155 |
| Abbildung 63: Zielgrößen eines hybriden Produktionssystems .....   | 159 |
| Abbildung 64: Bestimmung der Produktionslosgröße - Fall I .....  | 161 |
| Abbildung 65: Bestimmung der Produktionslosgröße - Fall II .....   | 162 |
| Abbildung 66: Bestimmung der Produktionslosgröße - Fall III .....  | 162 |
| Abbildung 67: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf die Termintreue .....                          | 166 |
| Abbildung 68: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf die Durchlaufzeit ..                           | 167 |
| Abbildung 69: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss zur Erstellung des<br>Produktmix je Aggregat ..... | 168 |
| Abbildung 70: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf die Auslastung je<br>Aggregat .....            | 169 |
| Abbildung 71: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf den Bestand .....                              | 170 |
| Abbildung 72: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf Umstellaufwand ....                            | 171 |
| Abbildung 73: Bewertungsinstrumentarium .....  | 172 |
| Abbildung 74: Anwendung Bewertungsinstrumentarium auf Zielgröße Termintreue .....  | 173 |
| Abbildung 75: Einfluss Produktionslos- bzw. Chargengröße auf Prozesse - Situation 1 .....                                      | 176 |
| Abbildung 76: Einfluss Produktionslos- bzw. Chargengröße auf Prozesse - Situation 2 .....                                      | 177 |
| Abbildung 77: Einfluss Produktionslos- bzw. Chargengröße auf Prozesse - Situation 3 .....                                      | 178 |
| Abbildung 78: Kennlinienverlauf Termintreue und Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss .....                                       | 181 |
| Abbildung 79: Kennlinienverlauf Durchlaufzeit unter Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss .....                                   | 182 |
| Abbildung 80: Kennlinie Produktmix unter Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss .....  | 183 |
| Abbildung 81: Kennlinienverlauf Auslastung unter Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss .....                           | 184 |
| Abbildung 82: Kennlinienverlauf Bestand unter Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss .....   | 185 |
| Abbildung 83: Kennlinie-Umstellaufwand-Herstellkosten unter Produktionslos- und Reihenfolgeeinfluss ..                         | 186 |
| Abbildung 84: Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf logistische Kennlinien .....                                   | 187 |
| Abbildung 85: Herstellkosten bei zunehmendem Produktmix und Umstellaufwand .....   | 188 |
| Abbildung 86: Puffer an der Schnittstelle Stoffumwandlung - Stoffumformung .....   | 189 |
| Abbildung 87: Kennlinienverläufe - Situation 1 .....   | 190 |
| Abbildung 88: Kennlinienverläufe - Situation 2 .....   | 191 |
| Abbildung 89: Kennlinienverläufe - Situation 3 .....   | 193 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 90: Überblicksdarstellung - Vorgehenskonzept.....                               | 194 |
| Abbildung 91: Vorgehenskonzept - Phase 1 .....  | 196 |
| Abbildung 92: Vorgehenskonzept - Phase 3.....   | 197 |
| Abbildung 93: Abstimmungsprozess - Variante A .....                                       | 198 |
| Abbildung 94: Abstimmungsprozess - Variante B .....                                       | 202 |
| Abbildung 95: Modellbasierter Erkenntnisprozess.....                                      | 202 |
| Abbildung 96: Materialfluss - Kupferhütte .....   | 206 |
| Abbildung 97: Subsystem Gießerei .....  | 208 |
| Abbildung 98: Auszug Auftragsliste .....  | 215 |
| Abbildung 99: Vorgehensweise zur Ermittlung der logistischen Zielgrößen .....             | 216 |
| Abbildung 100: enthaltene Formulare und Module im VBA-Skript.....                         | 217 |
| Abbildung 101: Fehlermeldung aufgrund unzulässiger Ofenzuordnung .....                    | 218 |
| Abbildung 102: Benutzermaske VBA-Skript Losgrößen- und Reihenfolgeplanung.....            | 219 |
| Abbildung 103: Hauptformular Start des Excel-Makros .....                                 | 220 |
| Abbildung 104: Auszug erstelltes Produktionsprogramm je Aggregat .....                    | 221 |
| Abbildung 105: Auszug Excel-Makro „Input_Gießerei_MWB“ .....                              | 221 |
| Abbildung 106: Simulationsmodell der Gießerei.....  | 223 |
| Abbildung 107: Zusammenhang Vorgehenskonzept und Bewertungsinstrumentarium.....           | 225 |
| Abbildung 108: Benutzeroberfläche Abstimmungsinstrumentarium .....                        | 226 |
| Abbildung 109: Hauptformular Abstimmungsinstrumentarium .....                             | 227 |
| Abbildung 110: Fehlermeldung - Anwahl mindestens einer Zielgröße .....                    | 228 |
| Abbildung 111: Infofeld - durch Abstimmungsprozess bessere Lösung gefunden.....           | 228 |
| Abbildung 112: Infofeld - durch Abstimmungsprozess keine bessere Lösung gefunden.....     | 228 |
| Abbildung 113: Auszug - Ergebnis Abstimmungsinstrumentarium.....                          | 228 |
| Abbildung 114: Angabe der Outputdateien der Simulationsläufe.....                         | 236 |
| Abbildung 115: Benutzeroberfläche VBA-Skript und Ergebnis Bewertungsinstrumentarium ..... | 237 |
| Abbildung 116: Kennlinienauswahl .....  | 237 |
| Abbildung 117: Kennliniendarstellung am Beispiel der Zielgröße Termintreue .....          | 238 |
| Abbildung 118: Auszug Excel-Makro „Output_Gießerei_MWB“ .....                             | 239 |
| Abbildung 119: Simulationsergebnisse für Testlauf - Fall 1a .....                         | 240 |
| Abbildung 120: Simulationsergebnisse für Testlauf - Fall 1b .....                         | 241 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 121: Simulationsergebnisse für Testlauf - Fall 2a .....             | 241 |
| Abbildung 122: Simulationsergebnisse für Testlauf - Fall 2b .....             | 242 |
| Abbildung 123: Verbesserungspotenzial I für März 2011 .....                   | 244 |
| Abbildung 124: Bestand und Produktionskosten [€] im Vergleich.....            | 244 |
| Abbildung 125: Verbesserungspotenzial II für Oktober 2011 .....               | 245 |
| Abbildung 126: Termintreue und Auslastung [%] im Vergleich .....              | 246 |
| Abbildung 127: Ergebnis des Bewertungsinstrumentariums für März 2011 .....    | 247 |
| Abbildung 128: Kennlinien Produktionskosten für März 2011 .....               | 248 |
| Abbildung 129: Ergebnis des Bewertungsinstrumentariums für Oktober 2011 ..... | 248 |
| Abbildung 130: Kennlinien Termintreue für Oktober 2011 .....                  | 250 |
| Abbildung 131: Ergebnis Experiment 1 - Kennlinienansätze .....                | 253 |
| Abbildung 132: Ergebnis Experiment 2 - Kennlinienansätze .....                | 254 |
| Abbildung 133: Ergebnis Experiment 3 - Kennlinienansätze .....                | 255 |
| Abbildung 134: Ergebnis Experiment 4 - Kennlinienansätze .....                | 255 |
| Abbildung 135: Anpassung durch Polynomregression 2. Ordnung .....             | 256 |
| Abbildung 136: Ergebnisse und Nutzen für die betriebliche Praxis .....        | 258 |
| Abbildung 137: Ergebnis Expertenbefragung I .....                             | 294 |
| Abbildung 138: Ergebnis Expertenbefragung II .....                            | 295 |

## Abkürzungsverzeichnis

|          |   |
|----------|---|
| et al.   | et alteri oder et alii = und andere   |
| f.       | folgende Seite  |
| ff.      | folgende Seiten   |
| Hrsg.    | Herausgeber   |
| PPS      | Produktionsplanungs- und -steuerungssystem                                    |
| s.       | siehe   |
| S.       | Seite   |
| u.a.     | und andere  |
| usw.     | und so weiter   |
| etc.     | et cetera = und so weiter   |
| Vgl.     | vergleiche  |
| Glg.     | Gleichung   |
| z.B.     | zum Beispiel  |
| bzw.     | beziehungsweise   |
| d.h.     | das heißt   |
| EPQ      | Economic Production Quantity  |
| SLULSP   | Single-Level Uncapacitated Lotsizing Problem                                  |
| CLSP     | Single-Level Capacitated Lotsizing Problem                                    |
| PLSP     | Proportional Lotsizing Problem  |
| DLSP     | Discrete Lotsizing and Scheduling Problem                                     |
| MLCLSP   | Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem                                     |
| MLPLSP   | Multi-Level Proportional Lotsizing Problem                                    |
| MLDLSP   | Multi-Level Discrete Lotsizing and Scheduling Problem                         |
| MLCLSD   | Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Sequence Dependent Setup Costs |
| MLGLSP   | Multi-Level General Lotsizing and Scheduling Problem                          |
| MLCLSP-L | Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Linked Lotsizes                |
| VBA      | Visual Basic for Applications   |
| RIO      | Rinneinduktionsofen   |



# 1 Einführung

In Kapitel 1 erfolgt zunächst die Einführung in die Problemstellung durch die Darstellung der dieser Arbeit zugrunde liegenden Ausgangssituation. Im Anschluss daran wird der strukturelle Aufbau der Dissertation erläutert und die Inhalte der einzelnen Kapitel vorgestellt.

## 1.1 Ausgangssituation

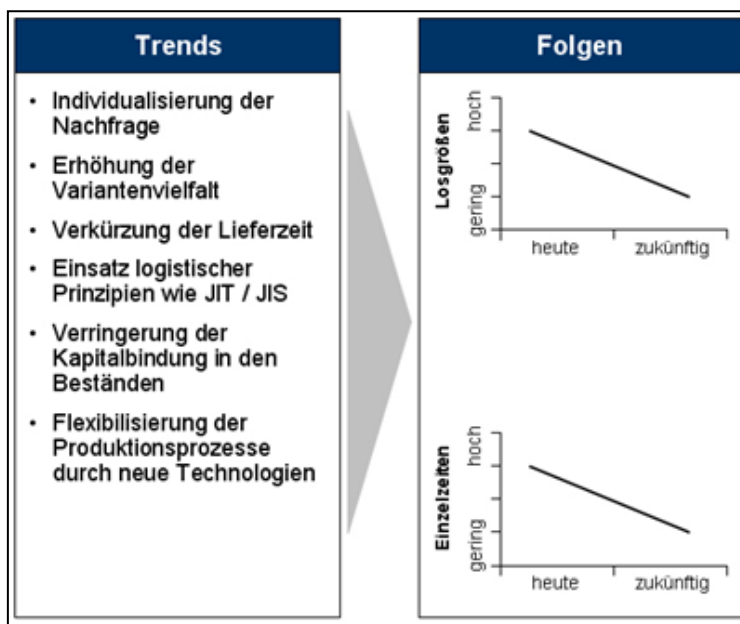
Aufgrund der in den letzten Jahren stetig gestiegenen Marktdynamik, dem immer härter werdenden Konkurrenzkampf am Markt aufgrund der fortschreitenden Globalisierung und einer Vielzahl an Anbietern sowie dem Trend zu spezifischen Kundenwünschen nahm die Notwendigkeit, die Produktion nach den Bedürfnissen der Kunden auszulegen, stetig zu, um so die individuelle Nachfrage erfüllen und damit langfristig die Beständigkeit und Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens garantieren zu können. Der Fokus produzierender Unternehmen liegt neben der Erreichung einer hohen Kundenzufriedenheit in der Wirtschaftlichkeit der Produktion.<sup>1</sup> Die Tatsache, dass durch die geeignete Bestimmung der Produktionslosgröße neben der Wirtschaftlichkeit auch die logistische Leistungsfähigkeit eines Systems positiv beeinflusst werden kann, fand bis dato in der betrieblichen Praxis unzureichend Beachtung. Jedoch hat die Bedeutung der Losgröße in den letzten Jahren stark zugenommen, da Produktionsunternehmen immer flexibler auf Kundenaufträge reagieren müssen, was mitunter in einer Steigerung der Anzahl unterschiedlicher Lose, welche in die Produktion eingelastet werden müssen, resultiert. Nun zeichnet sich in der Industrie, um der steigenden Dynamik des Marktes gerecht zu werden und um die unterschiedlichsten Fertigungslosgrößen unter Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Produktion und der daraus abgeleiteten Fokussierung auf minimale Rüstzeiten beherrschen zu können, eine vermehrte Berücksichtigung bzw. Fokussierung der Losgröße bereits in der Produktionsplanung ab. Fakt ist, dass die logistischen Zielgrößen einer Produktion durch die Fertigungslosgrößen beeinflusst werden können und die vermehrte Tendenz zu kleineren und damit flexibleren Losgrößen in der Praxis gegeben ist.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, führen die Individualisierung der Nachfrage und die damit verbundene Erhöhung der Variantenvielfalt sowie die Tendenz zu immer kürzeren Lieferzeiten und die Verringerung der Kapitalbindung in den Beständen zu geringeren Losgrößen in der Produktion, was in einem Komplexitätsanstieg der Produktionsplanung resultiert. Kleinere Losgrößen in der Produktion bewirken höhere Durchlaufzeiten aufgrund des vermehrten Rüstaufwandes und des damit verbundenen Anstiegs des Rüstzeitenanteils an der Produktionszeit. Die Durchlaufzeit einer Produktion wiederum beeinflusst laut Kennlinientheorie, den Durchsatz, die Kapazitätsauslastung, den Bestand und die Termintreue, womit der direkte

---

<sup>1</sup> Vgl. Krumpf (2001), S. 1.

Zusammenhang zwischen der Produktionslosgröße und den in logistischen Kennlinien abgebildeten Zielgrößen dargelegt ist.<sup>2</sup>



**Abbildung 1: Trends und Tendenzen in der Produktion und deren Folgen<sup>3</sup>**

Das Verfahren der durchlauforientierten Losgrößenbestimmung nach Nyhuis, welches auf den Erkenntnissen der Kennlinientheorie basiert und sich dadurch auszeichnet, dass die Kapitalbindung während des gesamten Auftragsdurchlaufs durch die Produktion zugrundegelegt wird, zeigt, dass die in einer Produktion minimal erreichbaren Durchlaufzeiten und Bestände maßgeblich durch die Fertigungslosgrößen (und Reihenfolge) bestimmt werden.<sup>4</sup>

Dieser Zusammenhang wird jedoch aufgrund der Tatsache, dass in der betrieblichen Praxis meist vorrangig betriebswirtschaftliche Parameter zur Bestimmung der Fertigungslosgröße herangezogen werden, oftmals außer Acht gelassen. So beruhen ein Großteil der klassischen Losgrößenbestimmungsverfahren<sup>5</sup> auf der Betrachtung der über die Losgröße gegenläufigen Kosten für die Lagerhaltung und den Auftragswechselkosten.<sup>6</sup> Der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Betriebskennlinien, im Speziellen auf den Durchsatz und die Kapazitätsauslastung einer Produktion und der damit verbundene Einfluss auf das Leistungsverhalten einer Produktion wird kaum bzw. unzureichend beachtet.

Da aber gerade die richtige bzw. geeignete Wahl der Produktionslosgröße und Reihenfolge einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Produktionsplanung und -steuerung leisten kann, werden in dieser Arbeit der grundlegende Zusammenhang, die Beeinflussung und die die Produktionsplanung betreffenden Auswirkungen der Beziehung zwischen der Losgröße und Reihenfolge und den logistischen Zielgrößen untersucht, bewertet, mit Hilfe eines Modells

<sup>2</sup> Siehe dazu Nyhuis et al. (1999, 2003, 2005).

<sup>3</sup> In Anlehnung an TCW (2010).

<sup>4</sup> Vgl. Nyhuis (1991), S. 93 ff.

<sup>5</sup> Siehe dazu ausführlich Abschnitt 3.4.

<sup>6</sup> Vgl. Nyhuis et al. (2003), S. 183.

beschrieben und dargestellt sowie durch die Entwicklung eines Vorgehenskonzeptes positiv beeinflusst. Beleuchtet wird vor allem die Problematik, dass bei der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgebestimmung neben der Berücksichtigung der Kundenwünsche oftmals nur kostenspezifische Überlegungen im Vordergrund stehen, bei der Betrachtung des Verhaltens logistischer Zielparameter hingegen der Einfluss kostenrelevanter Aspekte fehlt. Einen weiteren Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Betrachtung dieser Problematik im Hinblick auf die Anwendung in einem hybriden Produktionssystem, in welchem der Übergang von einer kontinuierlichen auf eine diskrete Fertigung erfolgt.

Es stellt sich daher die Frage, welche Ausprägungen der beschriebene Sachverhalt in hybriden Produktionssystemen annimmt und ob es eine Systematik gibt, welche der Problemstellung entgegengesetzt werden kann.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung werden zunächst ein Beschreibungs- und Erklärungsmodell entwickelt, welche die gewonnenen Erkenntnisse und Wirkungszusammenhänge betreffend der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf logistische Zielgrößen beschreiben, um davon ausgehend ein Instrumentarium zur Bewertung und ein Vorgehenskonzept zur positiven Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf logistische Zielgrößen in hybriden Produktionssystemen abzuleiten. Den Abschluss dieser Arbeit bildet die Verifizierung der entwickelten Vorgehensweise anhand einer realen Problemstellung in der Gießerei eines Hüttenwerkes, in welcher der Übergang von einem Stoffumwandlungsprozess auf einen Stoffumformungsprozess gegeben ist. Im Rahmen der praktischen Umsetzung erfolgt neben der Simulation des Produktionssystems und der Entwicklung eines Algorithmus zur Abstimmung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die gewünschten Zielgrößen auch die kritische Auseinandersetzung mit der Fragestellung, ob und inwieweit das entwickelte Vorgehenskonzept auf andere Produktionssysteme übertragen werden kann.

## 1.2 Struktur der Dissertationsschrift

Die Arbeit besteht aus sechs Teilen (siehe dazu Abbildung 2), welche im Nachfolgenden erläutert werden:

Nach der Einführung in die Thematik dieser Arbeit und der Erläuterung des strukturellen Aufbaus (**Kapitel 1**) erfolgt in **Kapitel 2** die Ausarbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen dieser Dissertation. Um die bestehenden Forschungslücken aufzuzeigen und bereits bestehende Konzepte vorzustellen, wird eine Literaturrecherche durchgeführt. Ebenso Inhalt dieses Kapitels ist die Betrachtung der Relevanz dieser Thematik für die betriebliche Praxis. Abgeleitet von den gewonnenen Erkenntnissen aus der Literaturrecherche und den aus einer Expertenbefragung ermittelten Handlungsbedarf seitens der Industrie, erfolgt die Vorstellung der

Forschungsfragen. Den Abschluss des zweiten Kapitels bildet die Erläuterung des Forschungsdesigns, d.h. die konkrete Vorgehensweise zum Erkenntnisgewinn.

In **Kapitel 3** wird eine Einführung in die wissenschaftstheoretischen Grundlagen, auf welchen diese Arbeit aufbaut, gegeben. Da die zu entwickelnden Modelle und das Konzept zur Vorgehensweise ihren Einsatz in einem hybriden Produktionssystem finden, erfolgt zunächst die Beschreibung und Charakterisierung dieses Produktionssystems sowie die Erläuterung jener Faktoren, welche das Systemverhalten maßgeblich beeinflussen. Anschließend werden die Grundlagen zur Kennlinientheorie erläutert, wobei im Speziellen auf die Ansätze der Kennlinienmodellierung eingegangen wird. Ebenso werden im dritten Kapitel die Verfahren zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung sowie die Grundlagen zur Systemtheorie und Kybernetik beschrieben. Einen weiteren Themenschwerpunkt von Kapitel 3 stellt die Theorie der Modellierung logistischer Systeme dar, welche die Darstellungsbasis der Zusammenhänge der Einflussnahme der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf das Leistungs- und Kostenverhalten einer Produktion bildet. In diesem Kapitel wird somit das Verständnis für die Methoden zur Modellerstellung entwickelt. Ebenso erfolgt in Kapitel 3 eine Einführung in die Simulation von Produktionssystemen, da diese bei der Umsetzung des Vorgehenskonzeptes anhand eines konkreten Fallbeispiels aus der betrieblichen Praxis Einsatz findet.

**Kapitel 4** bildet den Schwerpunkt dieser Arbeit, in welchem ein Bewertungsinstrumentarium sowie ein Vorgehenskonzept zur Verbesserung der Einflussnahme der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf logistische Zielgrößen vorgestellt werden. Dazu erfolgt zunächst die Identifizierung jener Faktoren, welche maßgeblich die Logistikleistung und Logistikkosten eines hybriden Produktionssystems beeinflussen. Darauf aufbauend wird die Erläuterung der entwickelten Modelle vorgenommen, mit Hilfe derer die Wirkungszusammenhänge der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf das logistische Leistungsverhalten und den Kosten einer Produktion beschrieben werden können. Anschließend erfolgt die Vorstellung des Bewertungsinstrumentariums und des Vorgehenskonzeptes, welche allgemeine Werkzeuge zur Bewertung und Verbesserung der Abstimmungsentscheidung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl auf logistischen Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem darstellen.

**Kapitel 5** hat die Verifizierung und Validierung der in Kapitel 4 entwickelten Modelle anhand einer realen Problemstellung aus der betrieblichen Praxis zum Inhalt. Ebenso erfolgt die Überprüfung des Bewertungsinstrumentariums und des Vorgehenskonzeptes durch die Umsetzung derer in Form eines Simulationsmodells und mittels Visual Basic for Applications (VBA)-Skripten. Den Abschluss von Kapitel 5 bilden die kritische Beurteilung der entwickelten Instrumentarien im industriellen Einsatz sowie die Veranschaulichung der durch die Konkretisierung gewonnenen Erkenntnisse. Ebenso wird in diesem Abschnitt die Frage der Adaptierbarkeit bzw. Übertragung der entwickelten Modelle auf andere Produktionssysteme beantwortet.

Mit einer Zusammenfassung der aus dieser Arbeit resultierenden Erkenntnisse und einem Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf findet diese Dissertation in **Kapitel 6** ihren Abschluss.



Abbildung 2: Struktur der Dissertationsschrift<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

## 2 Ableitung der wissenschaftlichen Fragestellung und des Forschungsdesigns

Zu Beginn dieses Kapitels wird ein Überblick über die der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden zentralen Begriffe gegeben. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse einer Literaturrecherche, welche der Erstellung dieser Arbeit vorausging, präsentiert und die Thematik der Problemstellung in der betrieblichen Praxis diskutiert, welche die Basis zur Ableitung der im Anschluss vorgestellten Forschungsfragen bilden. Abschließend folgt die Vorstellung der forschungsmethodischen Position, welche das Fundament dieser Dissertation darstellt.

### 2.1 Grundbegriffe

Nachfolgend werden nun die für diese Arbeit relevanten Grundbegriffe erläutert:

#### **Produktionslosgröße:**

„Unter einer (Produktions-) Losgröße versteht man eine Anzahl gleichartiger Objekte, die auf einem Arbeitsträger (Maschine) unmittelbar nacheinander ohne Rüstvorgänge zu fertigen sind. Diese beeinflussen in der Produktionsprogrammplanung vor allem die Höhe der in einer Planungsperiode oder pro Stück anfallenden losfixen Rüstkosten.“<sup>8</sup>

#### **Lossequenz- (Losreihenfolge)planung:**

„Darunter versteht man den Auflagezeitpunkt bzw. die Auflagereihenfolge von Losen verschiedener Produkte oder Baugruppen in einem Fertigungssystem. Die Auflagezeitpunkte bzw. -reihenfolgen müssen derart aufeinander abgestimmt werden, dass eine Lieferbereitschaft gemäß vorgegebenem Servicegrad für alle Produkte und Baugruppen sichergestellt wird.“<sup>9</sup>

#### **Rüsten:**

„Rüsten ist das Vorbereiten des Arbeitssystems für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe sowie – soweit erforderlich – das Zurücksetzen des Arbeitssystems in den ursprünglichen Zustand. Das Rüsten kommt im Allgemeinen einmal je Arbeitsauftrag vor.“<sup>10</sup>

#### **Logistische Kennlinien:**

Kennlinien sind als ... „die graphische Darstellung funktionaler Zusammenhänge zwischen einer unabhängigen Einflussgröße und einer sich daraus ergebenden in Form einer Kurve“<sup>11</sup> definiert. „Eine bestimmende interessierende abhängige Größe (die Zielgröße bzw. abhängi-

---

<sup>8</sup> Domschke et al. (1993), S.15.

<sup>9</sup> Wissenschaftslexikon Gabler (2012).

<sup>10</sup> REFA - Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (1997), S. 21.

<sup>11</sup> Nyhuis et al. (2003), S. 11.

ge Variable) wird als Funktion einer unabhängigen Variablen (der Einflussgröße) dargestellt. Für jeden Wert der durch äußere Bedingungen veränderlichen Einflussgröße lässt sich so (mindestens) ein Wert für die Zielgröße ermitteln.<sup>12</sup> Logistische Kennlinien basieren auf logistischen Wirkmodellen und visualisieren dabei den Zusammenhang logistischer Kennzahlen. Anwendung finden diese unter anderem bei der Visualisierung der Logistikleistung eines Arbeitssystems zur Beurteilung des aktuellen Systemzustandes sowie in der Planung von Ausgangsgrößen bei Variation der Eingangsgrößen eines Arbeitssystems.<sup>13</sup>

### **Beschreibungs-, Erklärungs- und Entscheidungsmodelle:**

Ein Modell ist ein Abbild, eine Repräsentation natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wie Modelle sein können. Ein Modell erfasst dabei prinzipiell nicht alle Attribute und Eigenschaften des Originals, sondern nur diejenigen die für die Anwendung relevant und nützlich erscheinen.<sup>14</sup>

In der Vergangenheit wurde unter einem Modell primär die Abbildung der Realität verstanden. Entsprechend ihrem Anwendungszweck und ihrem Entwicklungsstand können Modelle unter anderem in Beschreibungs-, Erklärungs- und Entscheidungsmodelle unterteilt werden:<sup>15</sup>

*Beschreibungsmodelle* bilden die Abhängigkeiten zwischen Funktions-, Struktur- und Verhaltensähnlichkeiten ab und/oder stellen die Wechselbeziehungen zwischen Handlungsalternativen und den daraus resultierenden Ergebnissen dar.

*Erklärungsmodelle* (auch als Wirkmodelle bezeichnet) liefern Erklärungen zu den beobachteten Abläufen und sind die Basis für Hypothesen und Gesetzmäßigkeiten um die Ursachen und deren Wirkungen zu ergründen.

*Entscheidungsmodelle* erleichtern die Bestimmung optimaler Handlungsmöglichkeiten durch Übertragung der in einem Erklärungsmodell gewonnenen Erkenntnisse auf einen praktischen Anwendungsbereich.<sup>16</sup>

### **Produktion:**

Als Produktion wird der Prozess der zielgerichteten Kombination von Produktionsfaktoren (Input) und deren Transformation in Produkte (Erzeugnisse, Output) verstanden.<sup>17</sup>

In der Betriebswirtschaftslehre wird der Begriff Produktion synonym mit der Herstellung, Fertigung bzw. Erzeugung von Gütern verwendet. Hingegen bezeichnet in den Ingenieurwissen-

---

<sup>12</sup> Nyhuis et al. (2003), S. 11.

<sup>13</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A-30.

<sup>14</sup> Vgl. Stachowiak (1973), S. 131.

<sup>15</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 8.

<sup>16</sup> Vgl. Schiemenz et al. (2005), S. 52.

<sup>17</sup> Vgl. Wirtschaftslexikon Gabler (2012).

schaften der Terminus Fertigung die zusammenbauende Produktion und der Begriff Erzeugung die chemische Produktion.<sup>18</sup>

### **Prozessindustrie (kontinuierliche Fertigung):**

Produzierende Unternehmen können in Unternehmen der Fertigungs- und der Prozessindustrie unterteilt werden. Diese Unterteilung beruht auf den diesen Industrien zugrundeliegenden Produktionsprozessen (kontinuierliche oder diskontinuierliche Fertigung). Erfolgt bei einem Produktionsprozess die Leistungserstellung auf Basis einer Stoffumwandlung (z.B. Stahlindustrie), so handelt es sich um ein Produktionssystem der Prozess- bzw. Verfahrensindustrie.

### **Fertigungsindustrie (diskontinuierliche Fertigung):**

Die Fertigungsindustrie (z.B. Automobilindustrie) hat die Stoffumformung (auch diskontinuierliche Produktion genannt) zum Inhalt.<sup>19</sup> Die Verfahren der Fertigungsindustrie dienen der Formgebung der eingebrachten Stoffe, wobei sowohl das Zusammenfügen von Teilen und Baugruppen sowie Trenn-, Zerlege- und Zerkleinerungsvorgänge dieser Industriegruppe angehören.<sup>20</sup>

Einen Spezialfall der diskontinuierlichen Fertigung stellt die Chargenproduktion dar. Dabei wird ein durch das Fassungsvermögen des Produktionsgefäßes (z.B. Schachtofen) begrenzte Menge an Einsatzstoffen als Ganzes dem Arbeitssystem zugeführt und nach Beendigung des Produktionsprozesses als Ganzes aus dem Arbeitssystem entnommen.<sup>21</sup> Ob nun eine Chargenproduktion aufgrund des verfahrenstechnischen Herstellungsprozesses zur Prozessindustrie gehört oder anhand der diskontinuierlichen Produktion als Teil der Fertigungsindustrie zu betrachten ist, geht aus der Literatur nicht eindeutig hervor.<sup>22</sup>

### **Schnittstelle Hybridfertigung (hybrides Produktionssystem):**

Da der Übergang zwischen der Prozess- und der Fertigungsindustrie oftmals fließend und daher eine eindeutige Abgrenzung bzw. Zuordnung zu einer der beiden Industrietypen kaum möglich ist, spricht man in der Literatur von einem hybriden Produktionssystem bzw. einer Hybridfertigung, welche(s) den Übergangsbereich zwischen der Prozess- und Fertigungsindustrie darstellt.<sup>23</sup> Gekennzeichnet ist diese(s) durch den Übergang des Produktionscharakters von einem Stoffumwandlungsprozess auf einen Stoffumformungsprozess. Ein hybrides Produktionssystem bzw. die Hybridfertigung wird in der vorliegenden Arbeit als Schnittstelle bezeichnet, da deren Produktionsstruktur die Schnittstelle von einer kontinuierlichen auf eine diskrete Fertigung bildet.

---

<sup>18</sup> Vgl. Wirtschaftslexikon Gabler (2012).

<sup>19</sup> Vgl. Adam (1997), S.14 f.

<sup>20</sup> Vgl. Fröhling (2006), S. 8.

<sup>21</sup> Vgl. Kummer et al. (2006), S. 155.

<sup>22</sup> Vgl. Deuse et al. (2006), S. 85.

<sup>23</sup> Vgl. Deuse et al. (2006), S. 85.



## 2.2 Stand der wissenschaftlichen Diskussion

Für die Ableitung der Forschungsfrage ist eine kritische Auseinandersetzung mit den bereits in der Wissenschaft existierenden Erkenntnissen und Methoden zu den Themengebieten „Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Prozess- und Fertigungsindustrie“, der „Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in hybriden Produktionssystemen“ und der „Beschreibung, Bewertung und Verbesserung der Losgrößeneinflusses auf logistische Kennlinien“ erforderlich. Es wurde daher, um einen Überblick über den wissenschaftlichen Stand zu erlangen, eine Literaturstudie durchgeführt, welche sich in die nachfolgenden drei Teile gliedert:

- Der erste Teil der Literaturrecherche beschäftigt sich der *Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Prozess- und Fertigungsindustrie*.
- Im zweiten Teil der Studie wird die *Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in hybriden Produktionssystemen* diskutiert.
- Da der Dissertationsfokus in der *Beschreibung, Bewertung und Verbesserung der Einflussnahme von Losgrößen auf die logistischen Kennlinien und den darin abgebildeten Zielgrößen* liegt, werden im dritten Teil der Literaturanalyse jene Publikationen vorgestellt, welche dieses Themengebiet umfassen.

### 2.2.1 Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Prozess- und Fertigungsindustrie

Der nachfolgende Abschnitt beinhaltet die Analyse von deutsch- und englischsprachigen Veröffentlichungen zum Thema der *Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Prozess- und Fertigungsindustrie*, welche den Fachbereichen „Operations Research“, und/oder „Produktionsmanagement“ zugeordnet werden können.

Die Selektion erfolgte auf Basis folgender Kriterien:

1. nach dem Zeitschriftenranking des VHB<sup>24</sup> (Stand: 2011), wobei die jeweils fünf höchstgereihten Journals eines Fachbereiches aufgenommen wurden,
2. der Schlagwortsuche in den wissenschaftlichen Datenbanken „Scopus“<sup>25</sup>, „Science Direct“<sup>26</sup> und „Emerald“<sup>27</sup>,
3. sowie der Schlagwortsuche im Onlinekatalog für Dissertationen und Habilitationen<sup>28</sup>.

---

<sup>24</sup> Siehe Zeitschriftenranking der Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft (VHB) Gesamtübersicht VHB-JOURQUAL2.1 bzw. Ranking\_Gesamt\_2.1.

<sup>25</sup> Die wissenschaftliche Datenbank Scopus ist im World Wide Web unter [www.scopus.com](http://www.scopus.com) zu finden.

<sup>26</sup> Die wissenschaftliche Datenbank Science Direct ist im World Wide Web unter [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) zu finden.

<sup>27</sup> Die wissenschaftliche Datenbank Emerald ist im World Wide Web unter [www.emeraldinsight.com](http://www.emeraldinsight.com) zu finden.

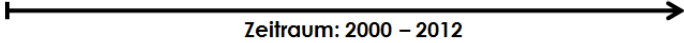
<sup>28</sup> Der Onlinekatalog für Dissertationen und Habilitationen ist im World Wide Web unter [www.dissonline.de](http://www.dissonline.de) zu finden.

Nachfolgend wird in Abbildung 3 ein Überblick der in die qualitative Analyse aufgenommenen Journals gegeben.

| in quantitative Analyse aufgenommene Journals:   |   |
|--|---|
| Fachbereich <b>Operations Research</b>   | Fachbereich <b>Produktionsmanagement</b>  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Operations Research</li> <li>2. OR Spectrum</li> <li>3. European Journal of Operational Research</li> <li>4. Computers and Operations Research</li> <li>5. Mathematical Methods for Operations Research</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Production and Operations Management</li> <li>2. Journal of Operations Management</li> <li>3. International Journal of Production Economics</li> <li>4. International Journal of Production Research</li> <li>5. International Journal of Operations &amp; Production Management</li> </ol> |

**Abbildung 3: in quantitative Literaturanalyse aufgenommene Journals<sup>29</sup>**

Um einen ersten Überblick über den Entwicklungsstand der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Prozess- und Fertigungsindustrie zu erhalten wurde zunächst eine quantitative Analyse der Datenbank „Science Direct“ im Zeitraum von 2000 bis 2012 von englischsprachigen Veröffentlichungen durchgeführt. Die Untersuchung bezog sich dabei auf die in Abbildung 4 angeführten Begriffe im Titel, der Kurzfassung und den Schlagwörtern der Veröffentlichungen.

|                          | Operations Research   | Produktionsmanagement                              | Fachbereich  |
|--------------------------|---|--|--|
|                          | englischsprachige Veröffentlichungen  |  |  |
| Manufacturing Industries | Batch Production Planning and/or Optimization   | Lot Size and/or Lot Sequence (Scheduling) Planning | Lot Size and/or Lot Sequence (Scheduling) Optimization |
| Process Industries       | Batch Production Planning and/or Optimization   | Lot Size and/or Lot Sequence (Scheduling) Planning | Lot Size and/or Lot Sequence (Scheduling) Optimization |
|                          | <br>Zeitraum: 2000 – 2012 |  |  |

**Abbildung 4: Suchbegriffe der quantitativen Analyse<sup>30</sup>**

<sup>29</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>30</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Aus der quantitativen Analyse der englischsprachigen Artikel in den oben angeführten Journals gingen die folgenden Ergebnisse hervor:

Es wurden bedeutend mehr Artikel zur Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Fertigungsindustrie als zur selbigen Thematik in der Prozessindustrie sowohl in Journals, welche dem Fachbereich „Produktionsmanagement“ zuordenbar sind, als auch in jenen des Fachbereichs „Operations Research“ gesichtet (siehe dazu Abbildungen 5 und 6).

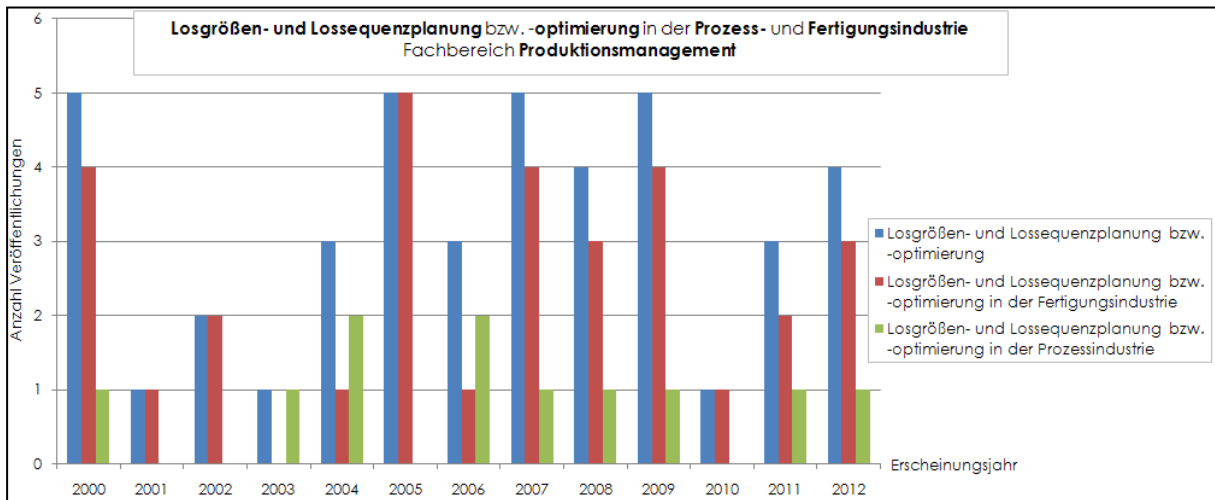


Abbildung 5: englischsprachige Veröffentlichungen im Vergleich I<sup>31</sup>

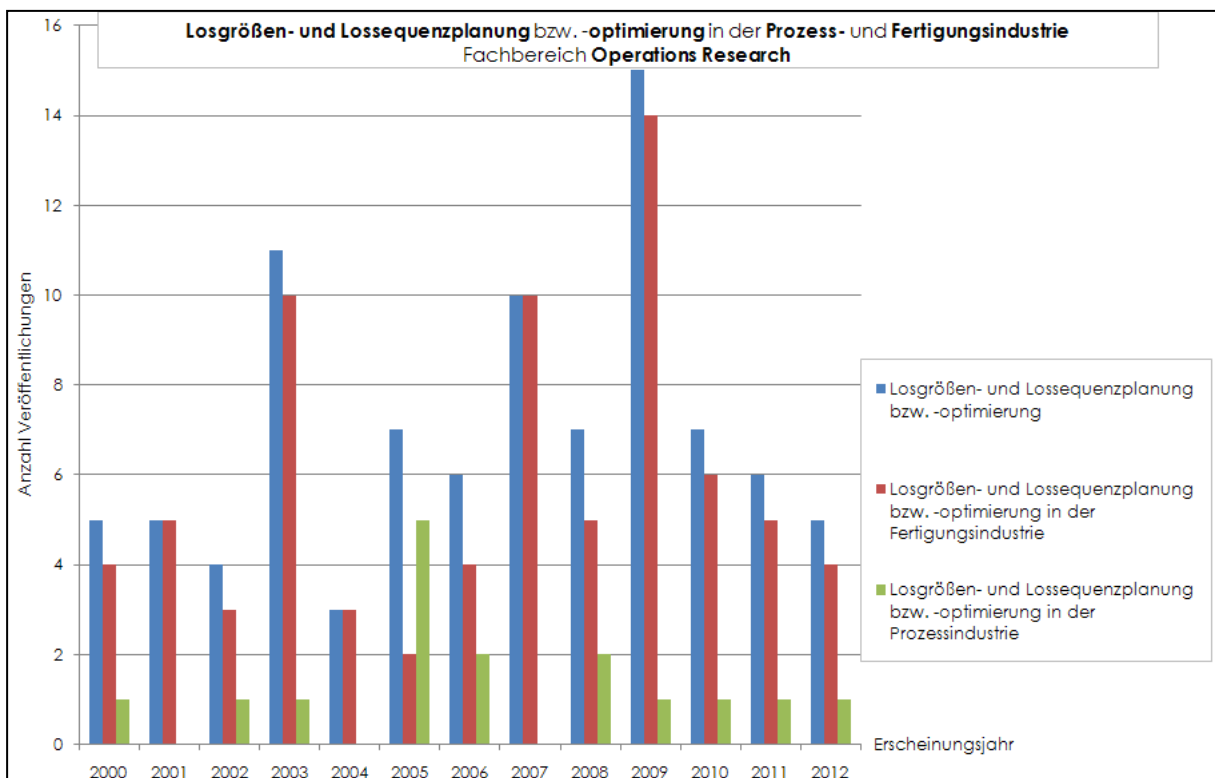


Abbildung 6: englischsprachige Veröffentlichungen im Vergleich II<sup>32</sup>

<sup>31</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>32</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Die Analyse der gefundenen Artikel hinsichtlich ihres zugehörigen Fachbereichs brachte die Erkenntnis, dass überwiegend mehr Artikel zu dieser Thematik im Bereich des „Operations Research“ als im Bereich des „Produktionsmanagements“ im Zeitraum von 2000 bis 2012 veröffentlicht wurden (siehe dazu Abbildung 7).

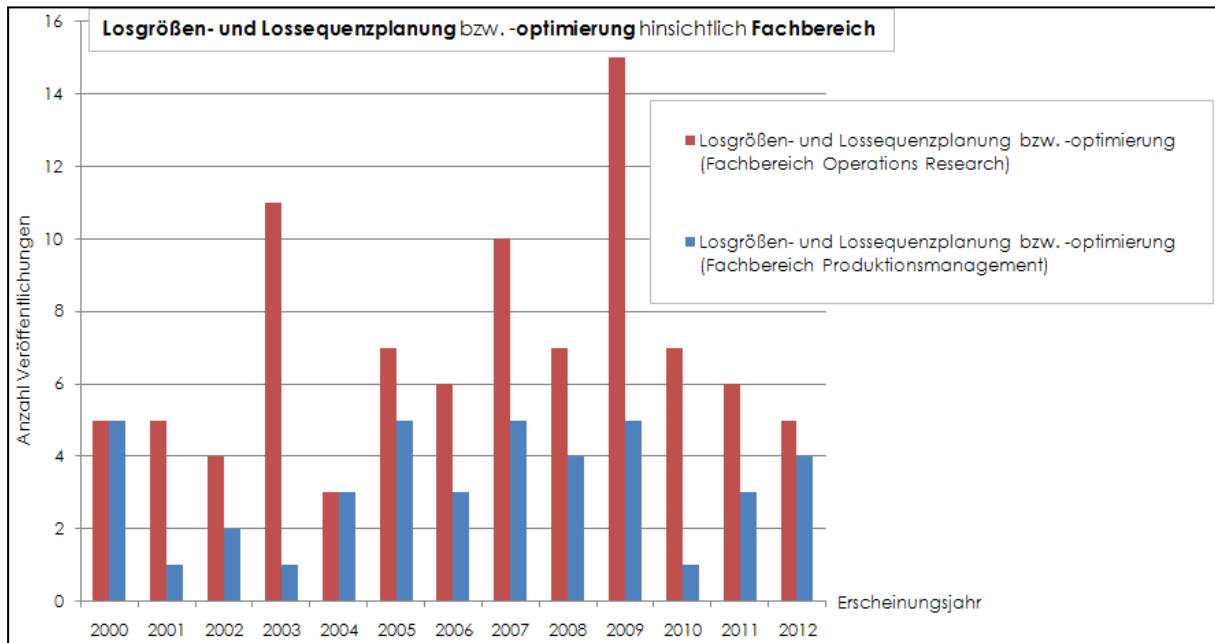


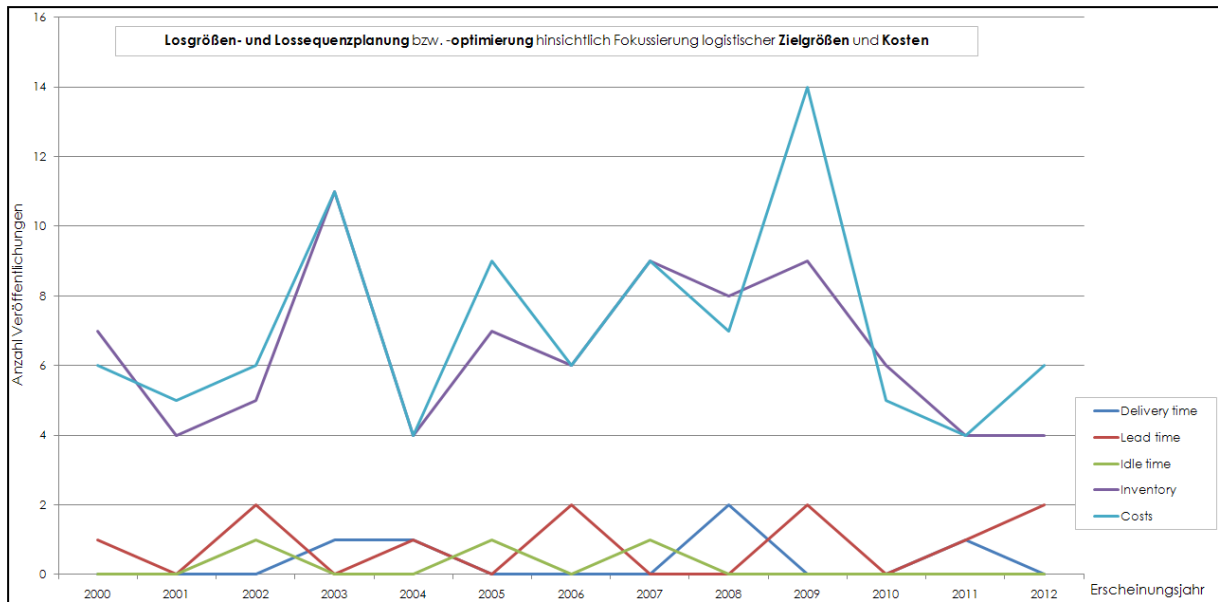
Abbildung 7: englischsprachige Veröffentlichungen - Fachbereich<sup>33</sup>

Weiters konnte bei der quantitativen Analyse der englischsprachigen Artikel hinsichtlich der bei der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung fokussierenden Zielgrößen festgestellt werden, dass die meisten der gefundenen Artikel kostenspezifische Aspekte und eine vergleichsweise geringe Anzahl an Veröffentlichungen die logistischen Zielgrößen bei der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung verfolgen (siehe dazu Abbildung 8). Pahl, Voß und Woodruff<sup>34</sup> bieten in ihrer 2007 erschienen Veröffentlichung eine Zusammenfassung aller wesentlichen mathematischen Verfahren zur Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung, welche dabei die Zielgröße der Termintreue fokussieren und bestätigen damit, wie auch in Abbildung 8 ersichtlich ist, dass die logistische Zielgröße Termintreue in den letzten Jahren vermehrt fokussiert wurde. Weiters weisen diese darauf hin, dass aber im Bereich der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung, welche andere Zielgrößen wie beispielsweise die Durchlaufzeit, die Auslastung, den Produktmix etc. betrachten, noch erheblicher Forschungsbedarf herrscht.<sup>35</sup>

<sup>33</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>34</sup> Siehe Pahl; Voß; Woodruff (2007).

<sup>35</sup> Vgl. Pahl et al. (2007), S. 297 ff.

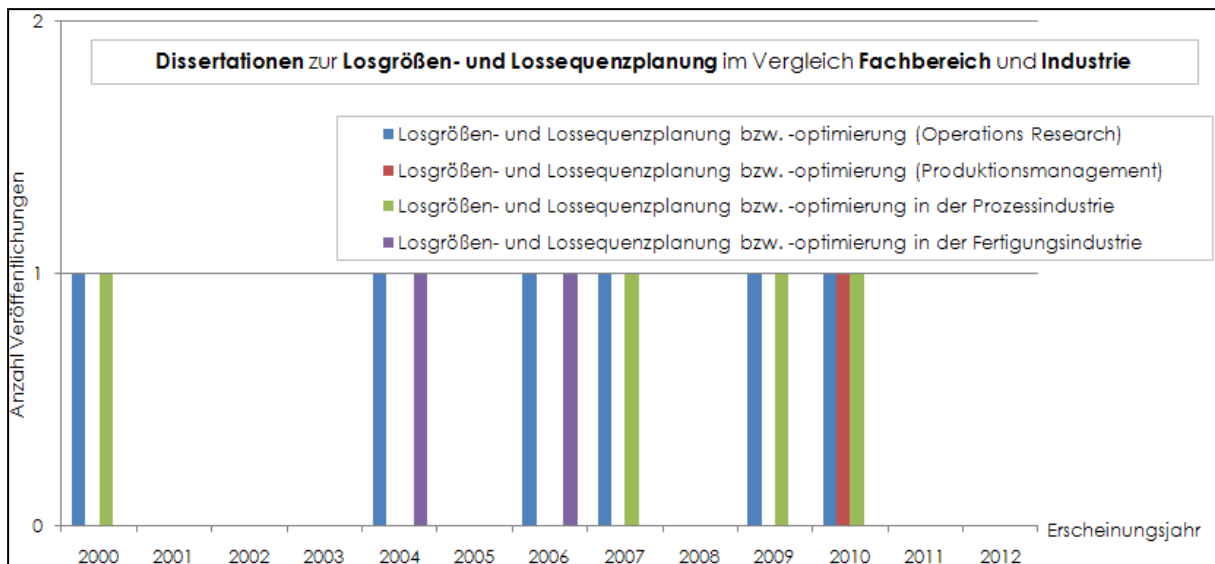


**Abbildung 8: englischsprachige Veröffentlichungen - Vergleich der Zielgrößen<sup>36</sup>**

Im Anschluss daran wurde, um einen Überblick über die Forschungstätigkeiten hinsichtlich dieser Thematik in den Fachbereichen des „Operations Research“ und des „Produktionsmanagements“ im Zeitraum von 2000 bis 2012 zu erhalten, im *Onlinekatalog für Dissertationen und Habilitationen* nach dazu verfassten Hochschulschriften gesucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die zur Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung verfassten Schriften bis auf eine Ausnahme alle dem Fachbereich des „Operations Research“ zuzuordnen sind (siehe dazu Abbildung 9). Nur die von Seipl<sup>37</sup> verfasste Dissertation zur Simulation von kontinuierlichen Prozessen in hierarchischen Produktionsplanungssystemen beschäftigt sich aus betriebswirtschaftlicher Sicht mit der Frage, wie die Losgrößenplanung in der Prozessindustrie in Abhängigkeit von der Nachfrage zu erfolgen hat.

<sup>36</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>37</sup> Siehe Seipl (2009).

Abbildung 9: Dissertationen nach Fachbereich und Industrie<sup>38</sup>

Die Untersuchung der gefundenen Dissertationen hinsichtlich der diesen Arbeiten zugrundeliegenden Industrien brachte die Erkenntnis, dass in diesen überwiegend Problematiken der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Prozessindustrie behandelt werden (siehe Abbildung 9). Dies lässt die Vermutung zu, dass im Bereich der Losgrößen- und Lossequenzplanung in der Prozessindustrie noch Forschungsbedarf herrscht.

Daran anschließend wurde nach deutschsprachigen Artikeln gesucht. Relevante Artikel dazu konnten in der *Zeitschrift für Betriebswirtschaft (ZfB)*<sup>39</sup> und in der *Zeitschrift für Wirtschaftliches Studium (WiSt)*<sup>40</sup> gesichtet werden (siehe dazu Tabelle 1).

Die gefundenen deutschsprachigen Dissertationen wurden im *Onlinekatalog für Dissertationen und Habilitationen*<sup>41</sup> gefunden und sind in Tabelle 2 angeführt. Die Auswahl der Publikationen wurde hinsichtlich ihrer Anwendungsorientierung im betrieblichen Einsatz und nach bei der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung stattfindenden Berücksichtigung bzw. Fokussierung von kostenspezifischen Aspekten und/oder logistischen Zielgrößen getroffen.

Nachfolgend wird nun die Auswertung der Veröffentlichungen von Tabelle 1 und 2 (im Bezug auf deren Anwendung und der Berücksichtigung logistischer Zielgrößen bzw. kostenspezifischer Aspekte bei der Planung bzw. Optimierung) vorgenommen. Dabei wurde untersucht, in welcher Industrie, unter Fokussierung welcher Zielgrößen und unter Zuhilfenahme welchen Verfahrens die Losgrößen- und/oder Lossequenzplanung bzw. -optimierung durchgeführt wurde (siehe dazu Tabellen 3 und 4). Für die detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahren zur Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung siehe Abschnitt 3.4.

<sup>38</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>39</sup> Die Zeitschrift für Betriebswirtschaft ist im World Wide Web unter [www.zfb-online.de](http://www.zfb-online.de) zu finden.

<sup>40</sup> Die Zeitschrift Wirtschaftliches Studium ist im World Wide Web unter [www.vahlen.becksche.de](http://www.vahlen.becksche.de) zu finden.

<sup>41</sup> Der Onlinekatalog für Dissertationen und Habilitationen ist im World Wide Web unter [www.dissonline.de](http://www.dissonline.de) zu finden.

Tabelle 1: Übersicht deutschsprachige Artikel<sup>42</sup>

| Jahr | Journal | Titel des Artikels   | Inhalt/Thema                         | Industrie           |
|------|---------|--|--------------------------------------|---------------------|
| 2004 | ZfB     | Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei mehrstufiger kontinuierlicher Fertigung <sup>43</sup>          | Losgrößen- und Lossequenzplanung     | Prozessindustrie    |
| 2004 | WiSt    | Ressourceneinsatzplanung bei Chargenproduktion in der chemischen Industrie <sup>44</sup>                       | Lossequenzplanung                    | Prozessindustrie    |
| 2005 | ZfB     | Reihenfolgeplanung bei Variantenfließfertigung: Ein integrativer Ansatz <sup>45</sup>                          | Lossequenzoptimierung                | Prozessindustrie    |
| 2005 | ZfB     | Ein Ansatz zum General Lot Sizing and Scheduling Problem (GLSP) für die mehrstufige Fertigung <sup>46</sup>    | Losgrößen- und Lossequenzplanung     | Fertigungsindustrie |
| 2006 | ZfB     | Ein modellgestützter Ansatz zur mittelfristigen Produktions- und Ablaufplanung für eine Brauerei <sup>47</sup> | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Prozessindustrie    |

---

<sup>42</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>43</sup> Siehe Meyer (2004).

<sup>44</sup> Siehe Günther (2004).

<sup>45</sup> Siehe Boysen (2005).

<sup>46</sup> Siehe Fandel; Stammen-Hegener (2005).

<sup>47</sup> Siehe Förster; Haase; Tönnies (2006).

Tabelle 2: Übersicht Dissertationen I<sup>55</sup>

| Jahr | Titel der Dissertation   | Inhalt/Thema                         | Industrie                        |
|------|--|--------------------------------------|----------------------------------|
| 2000 | Produktionsplanung in der Prozessindustrie: Modelle, effiziente Algorithmen und Umsetzung <sup>48</sup>  | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Prozessindustrie                 |
| 2004 | Optimierung von Problemstellungen aus der diskreten und der Prozessindustrie unter Verwendung physikalischer Verfahren <sup>49</sup>                         | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Fertigungs- und Prozessindustrie |
| 2006 | Ein genetischer Algorithmus zur kostenorientierten Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung bei getakteten Mehrproduktfließlinien <sup>50</sup>                  | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Fertigungs- und Prozessindustrie |
| 2007 | Operative Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Industrie <sup>51</sup>  | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Prozessindustrie                 |
| 2009 | Erzeugung von Produktionsplänen für die Pharmawirkstoffherstellung durch Kombination metaheuristischer Elemente und mathematischer Optimierung <sup>52</sup> | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Prozessindustrie                 |
| 2009 | Simulation kontinuierlicher Prozesse in hierarchischen Produktionsplanungssystemen: Entwicklung von Werkzeugen und Analyse <sup>53</sup>                     | Losgrößenplanung                     | Prozessindustrie                 |
| 2010 | Mehrstufige Losgrößenplanung bei Kapazitätsrestriktionen <sup>54</sup>   | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Prozessindustrie                 |

---

<sup>48</sup> Siehe Scharbrodt (2000).

<sup>49</sup> Siehe Puchta (2004).

<sup>50</sup> Siehe Reidel (2006).

<sup>51</sup> Siehe Schoner (2007).

<sup>52</sup> Siehe Weber (2009).

<sup>53</sup> Siehe Seipl (2009).

<sup>54</sup> Siehe Sahling (2010).

<sup>55</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.



Tabelle 3: Auswertung deutschsprachige Artikel nach Zielgröße und Lösungsverfahren<sup>62</sup>

| Titel des Artikels   | Inhalt                               | Zielgröße  | Verfahren        |
|--|--------------------------------------|--|------------------|
| Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei mehrstufiger kontinuierlicher Fertigung <sup>56</sup>          | Losgrößen- und Lossequenzplanung     | Produktionskosten, reihenfolgeabhängige Rüstkosten, Lagerkosten    | MP <sup>57</sup> |
| Ressourceneinsatzplanung bei Chargenproduktion in der chemischen Industrie <sup>58</sup>                       | Lossequenzplanung                    | Produktionskosten, reihenfolgeabhängige Rüstkosten, Lagerkosten    | MP               |
| Reihenfolgeplanung bei Variantenfließfertigung: Ein integrativer Ansatz <sup>59</sup>                          | Lossequenzoptimierung                | Varianten  | MP               |
| Ein Ansatz zum General Lot Sizing and Scheduling Problem (GLSP) für die mehrstufige Fertigung <sup>60</sup>    | Losgrößen- und Lossequenzplanung     | Produktionskosten, Rüstkosten, Lagerkosten                         | MP               |
| Ein modellgestützter Ansatz zur mittelfristigen Produktions- und Ablaufplanung für eine Brauerei <sup>61</sup> | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Lager- und Produktionskapazitäten, reihenfolgeabhängige Rüstzeiten | MP               |

---

<sup>56</sup> Siehe Meyer (2004).

<sup>57</sup> MP... mathematische Programmierung; siehe ausführlich dazu Abschnitt 3.4.2.2

<sup>58</sup> Siehe Günther (2004).

<sup>59</sup> Siehe Boysen (2005).

<sup>60</sup> Siehe Fandel; Stammen-Hegener (2005).

<sup>61</sup> Siehe Förster; Haase; Tönnies (2006).

<sup>62</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Tabelle 4: Auswertung Dissertationen nach Zielgröße und Lösungsverfahren<sup>63</sup>

| Titel der Dissertation   | Inhalt                               | Zielgröße   | Verfahren        |
|--|--------------------------------------|---|------------------|
| Produktionsplanung in der Prozessindustrie: Modelle, effiziente Algorithmen und Umsetzung <sup>64</sup>  | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Bestand   | MP <sup>65</sup> |
| Optimierung von Problemstellungen aus der diskreten und der Prozessindustrie unter Verwendung physikalischer Verfahren <sup>66</sup>                         | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Durchlaufzeit   | MP               |
| Ein genetischer Algorithmus zur kostenorientierten Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung bei getakteten Mehrproduktfließlinien <sup>67</sup>                  | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Produktionskosten, reihenfolgeabhängige Rüstkosten, Lagerkosten | MP               |
| Operative Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Industrie <sup>68</sup>  | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Durchlaufzeit   | MP               |
| Erzeugung von Produktionsplänen für die Pharmawirkstoffherstellung durch Kombination metaheuristischer Elemente und mathematischer Optimierung <sup>69</sup> | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Produktionskosten, Rüstkosten, Lagerkosten                      | MP               |
| Simulation kontinuierlicher Prozesse in hierarchischen Produktionsplanungssystemen: Entwicklung von Werkzeugen und Analyse <sup>70</sup>                     | Losgrößenplanung                     | Nachfrage   | Simulation       |
| Mehrstufige Losgrößenplanung bei Kapazitätsrestriktionen <sup>71</sup>   | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Produktionskosten, reihenfolgeabhängige Rüstkosten, Lagerkosten | MP               |

<sup>63</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>64</sup> Siehe Scharbrodt (2000).

<sup>65</sup> MP... mathematische Programmierung; siehe ausführlich dazu Abschnitt 3.4.2.2

<sup>66</sup> Siehe Puchta (2004).

<sup>67</sup> Siehe Reidel (2006).

<sup>68</sup> Siehe Schoner (2007).

<sup>69</sup> Siehe Weber (2009).

<sup>70</sup> Siehe Seipl (2009).

<sup>71</sup> Siehe Sahling (2010).

Auffallend ist, dass sich alle deutschsprachigen Publikationen mit der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung hinsichtlich einer logistischen Zielgröße oder kostenspezifischen Aspekten durch Verfahren, welche auf der mathematischen Programmierung beruhen, beschäftigen. Es konnte keine deutschsprachige Veröffentlichung gefunden werden, welche simultan sowohl kostenspezifische als auch produktionslogistische Aspekte bei der Planung gleichermaßen berücksichtigt, was wiederum die aus der quantitativen Analyse getroffene Annahme, dass zumeist entweder Kostenüberlegungen im Vordergrund stehen oder die Fokussierung einer logistischen Zielgröße bei der Planung bzw. Optimierung erfolgt, bestätigt.

Im Anschluss daran wurden die englischsprachigen Artikel zur Losgrößen- und Lossequenzplanung in der Prozess- und Fertigungsindustrie beleuchtet. Bei der Auswahl der Paper wurden wiederum die Anwendbarkeit der beschriebenen Verfahren im betrieblichen Einsatz und die bei der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung stattfindende Berücksichtigung logistischer Zielgrößen fokussiert. Da im Zuge der quantitativen Analyse festgestellt werden konnte, dass die meisten Artikel im *International Journal of Production Economics (IJPE)* und im *European Journal of Operational Research (EJOR)* veröffentlicht wurden, wurde die Detailsuche nach englischsprachigen Artikel auf diese beiden Journals begrenzt.

Tabelle 5 und 6 geben einen Auszug der relevantesten, englischsprachigen Artikel, welche anschließend (siehe Tabellen 7 und 8) analog zu den deutschsprachigen Veröffentlichungen hinsichtlich der bei der Planung bzw. Optimierung berücksichtigenden Zielgrößen und des verwendeten Lösungsverfahrens ausgewertet wurden.

Tabelle 5: Auszug englischsprachige Artikel I - Teil 1<sup>72</sup>

| Jahr | Journal | Titel des Artikels  | Inhalt                               | Industrie           |
|------|---------|---|--------------------------------------|---------------------|
| 2000 | IJPE    | An integrated Lagrangean relaxation-simulated annealing approach to the multi-level multi-item capacitated lot sizing problem <sup>73</sup> | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Fertigungsindustrie |
| 2002 | IJPE    | An optimization model for refinery production scheduling <sup>74</sup>  | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Prozessindustrie    |
| 2004 | IJPE    | Group technology in a hybrid flow shop environment: A case study <sup>75</sup>  | Lossequenzoptimierung                | Prozessindustrie    |
| 2004 | IJPE    | The stochastic dynamic production/inventory lot-sizing problem with service-level constraints <sup>76</sup>                                 | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Fertigungsindustrie |
| 2004 | IJPE    | A memetic algorithm for a multistage capacitated lot-sizing problem <sup>77</sup>   | Losgrößenoptimierung                 | Fertigungsindustrie |
| 2006 | EJOR    | A planning and scheduling model for onsertion in printed circuit board assembly <sup>78</sup>   | Lossequenzoptimierung                | Fertigungsindustrie |
| 2006 | EJOR    | Synchronisation in common cycle lot size scheduling for a multi-product serial supply chain <sup>79</sup>                                   | Lossequenzoptimierung                | Fertigungsindustrie |
| 2007 | IJPE    | Lot sizing problem on a paper machine under a cyclic production approach <sup>80</sup>  | Losgrößenoptimierung                 | Prozessindustrie    |

<sup>72</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>73</sup> Siehe Özdamar; Barbarosoglu (2000).

<sup>74</sup> Siehe Göthe-Lundgren; Lundgren; Persson (2002).

<sup>75</sup> Siehe Andres; Albarracin; Tormo; Vicens; Garcia-Sabater (2004).

<sup>76</sup> Siehe Kingsman; Tarim (2004).

<sup>77</sup> Siehe Berretta; Rodrigues (2004).

<sup>78</sup> Siehe Ashazeri; Selen (2006).

<sup>79</sup> Siehe Hoque; Kingsman (2006).

<sup>80</sup> Siehe Bouchriha; Ouhimmou; D'Amours (2007).

Tabelle 6: Auszug englischsprachige Artikel I - Teil 2<sup>81</sup>

| Jahr | Journal | Titel des Artikels   | Inhalt                               | Industrie           |
|------|---------|--|--------------------------------------|---------------------|
| 2007 | EJOR    | Using aggregation to optimize long-term production planning at underground mine <sup>82</sup>                                  | Lossequenzoptimierung                | Prozessindustrie    |
| 2009 | IJPE    | Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot-scheduling models for small-scale soft drinks plants <sup>83</sup> | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Prozessindustrie    |
| 2009 | EJOR    | Planning for demand failure: A dynamic lot size model for clinical trial supply chains <sup>84</sup>                           | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Prozessindustrie    |
| 2009 | EJOR    | A heuristic approach for big bucket multi-level production planning problems <sup>85</sup>                                     | Lossequenzoptimierung                | Fertigungsindustrie |
| 2011 | EJOR    | Multi-level single machine lot-sizing and scheduling with zero lead times <sup>86</sup>  | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Prozessindustrie    |
| 2011 | IJPE    | Genetic algorithm-based heuristic for capacitated lotsizing problem in flow shops with sequence dependent setups <sup>87</sup> | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Fertigungsindustrie |
| 2011 | EJOR    | An optimization framework for solving capacitated multi-level lot-sizing problems with backlogging <sup>88</sup>               | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Fertigungsindustrie |
| 2012 | EJOR    | Single-stage formulations for synchronised two-stage lot sizing and scheduling in soft drink production <sup>89</sup>          | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Prozessindustrie    |

---

<sup>81</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>82</sup> Siehe Newman; Kuchta (2007).

<sup>83</sup> Siehe Ferreira; Morabito; Rangel (2009).

<sup>84</sup> Siehe Fleischhacker; Zhao (2009).

<sup>85</sup> Siehe Akartunali; Miller (2009).

<sup>86</sup> Siehe Stadler (2011).

<sup>87</sup> Siehe Mohammadi; Fatemi Ghomi (2011).

<sup>88</sup> Siehe Wu; Shi; Geunes; Akartunali (2011).

<sup>89</sup> Siehe Ferreira; Clark; Bernardo; Morabito (2012).

Tabelle 7: Auswertung englischsprachige Artikel nach Zielgröße und Lösungsverfahren - 1<sup>90</sup>

| Titel des Artikels  | Inhalt                               | Zielgröße   | Verfahren                    |
|---|--------------------------------------|---|------------------------------|
| An integrated Lagrangean relaxation-simulated annealing approach to the multi-level multi-item capacitated lot sizing problem <sup>91</sup> | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Rüstzeiten  | Lagrange-Heuristik           |
| An optimization model for refinery production scheduling <sup>92</sup>  | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Produktionskosten, reihenfolgeabhängige Rüstkosten, Lagerkosten und Termintreue | Lineare Programmierung       |
| Group technology in a hybrid flow shop environment: A case study <sup>93</sup>  | Lossequenzoptimierung                | Rüstzeiten, Durchlaufzeit   | Heuristik                    |
| The stochastic dynamic production/inventory lot-sizing problem with service-level constraints <sup>94</sup>                                 | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Produktionskosten, reihenfolgeabhängige Rüstkosten, Lagerkosten und Termintreue | Mixed Integer Programmierung |
| A memetic algorithm for a multistage capacitated lot-sizing problem <sup>95</sup>   | Losgrößenoptimierung                 | Rüstzeiten, Rüstkosten  | Metaheuristik                |
| A planning and scheduling model for onsertion in printed circuit board assembly <sup>96</sup>   | Lossequenzoptimierung                | Rüstzeiten, Durchlaufzeit   | Integer Programmierung       |
| Synchronisation in common cycle lot size scheduling for a multi-product serial supply chain <sup>97</sup>                                   | Lossequenzoptimierung                | Produktionskosten   | Heuristik                    |
| Lot sizing problem on a paper machine under a cyclic production approach <sup>98</sup>  | Losgrößenoptimierung                 | Termintreue   | Lineare Programmierung       |

<sup>90</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>91</sup> Siehe Özdamar; Barbarosoglu (2000).

<sup>92</sup> Siehe Göthe-Lundgren; Lundgren; Persson (2002).

<sup>93</sup> Siehe Andres; Albarracin; Tormo; Vicens; Garcia-Sabater (2004).

<sup>94</sup> Siehe Kingsman und Tarim (2004).

<sup>95</sup> Siehe Berretta; Rodrigues (2004).

<sup>96</sup> Siehe Ashazeri; Selen (2006).

<sup>97</sup> Siehe Hoque; Kingsman (2006).

<sup>98</sup> Siehe Bouchriha; Ouhimmou; D'Amours (2007).

Tabelle 8: Auswertung englischsprachige Artikel nach Zielgröße und Lösungsverfahren - 2<sup>99</sup>

| Titel des Artikels  | Inhalt                               | Zielgröße                                  | Verfahren                    |
|---|--------------------------------------|--|------------------------------|
| Using aggregation to optimize long-term production planning at underground mine <sup>100</sup>                                  | Lossequenzoptimierung                | Auslastung                                 | Mixed Integer Programmierung |
| Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot-scheduling models for small-scale soft drinks plants <sup>101</sup> | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Rüstkosten                                 | Fix&Relax Heuristik          |
| Planning for demand failure: A dynamic lot size model for clinical trial supply chains <sup>102</sup>                           | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Produktionskosten, Rüstkosten, Lagerkosten | Metaheuristik                |
| A heuristic approach for big bucket multi-level production planning problems <sup>103</sup>                                     | Lossequenzoptimierung                | Produktionskosten                          | Fix&Relax Heuristik          |
| Multi-level single machine lot-sizing and scheduling with zero lead times <sup>104</sup>  | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Termintreue                                | Mixed Integer Programmierung |
| Genetic algorithm-based heuristic for capacitated lotsizing problem in flow shops with sequence dependent setups <sup>105</sup> | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Rüstzeiten                                 | Genetischer Algorithmus      |
| An optimization framework for solving capacitated multi-level lot-sizing problems with backlogging <sup>106</sup>               | Losgrößen- und Lossequenzoptimierung | Produktions- und Bestandskosten            | Integer Programmierung       |
| Single-stage formulations for synchronised two-stage lot sizing and scheduling in soft drink production <sup>107</sup>          | Lossequenzoptimierung                | Rüstzeiten und Rüstkosten                  | Traveling-Salesman-Problem   |

<sup>99</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.<sup>100</sup> Siehe Newman; Kuchta (2007).<sup>101</sup> Siehe Ferreira; Morabito; Rangel (2009).<sup>102</sup> Siehe Fleischhacker; Zhao (2009).<sup>103</sup> Siehe Akartunali; Miller (2009).<sup>104</sup> Siehe Stadler (2011).<sup>105</sup> Siehe Mohammadi; Fatemi Ghomi (2011).<sup>106</sup> Siehe Wu; Shi; Geunes; Akartunali (2011).<sup>107</sup> Siehe Ferreira; Clark; Bernardo; Morabito (2012).

Die Analyse der englischsprachigen Literatur brachte die Erkenntnis, dass sich alle ausgewählten Publikationen mit der Optimierung der Losgrößen- und Lossequenzplanung durch Anwendung eines Algorithmus beschäftigen. Den meisten vorgestellten Artikeln ist, wie auch schon bei der Analyse der deutschsprachigen Veröffentlichungen festgestellt werden konnte, die Tatsache gemein, dass entweder kostenspezifische Aspekte im Vordergrund stehen oder die Fokussierung auf einzelne logistische Zielgrößen angestellt werden. Veröffentlichung, welche bei der Planung bzw. Optimierung der Losgröße und/oder Lossequenz sowohl kostenspezifische Aspekte als auch logistische Zielgrößen gleichermaßen fokussieren, stellen eine Ausnahme dar. Weiters beschreiben alle gefundenen Veröffentlichungen eine spezifische Problemstellung der Losgrößen- und/oder Lossequenzplanung bzw. -optimierung an einem konkreten Fallbeispiel. Eine Veröffentlichung, welche eine allgemeine Vorgehensweise zur Planung bzw. Optimierung der Losgrößen- und Lossequenzplanung beschreibt, wurde nicht gesichtet.

### **2.2.2 Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in hybriden Produktionssystemen**

Im Anschluss daran erfolgte die Suche nach deutsch- und englischsprachigen Veröffentlichungen zur Thematik der *Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in hybriden Produktionssystemen*. Diese wurde analog wie zur oben beschriebenen Literaturstudie durchgeführt. Bei der Suche (siehe dazu Abbildung 10) nach deutschsprachigen Veröffentlichungen wurden die Begriffe „Losgrößenplanung“, „Lossequenzplanung“, „Losgrößenoptimierung“, „Lossequenzoptimierung“, „semi-kontinuierlich“, „Chargenproduktion“, „hybrides Produktionssystem“, „hybride Fertigung“ und „Hybridfertigung“ verwendet.

Die Suche nach deutschsprachigen Veröffentlichungen und Dissertationen zu dieser Thematik brachte nur einen Treffer, dessen Inhalt zu einem späteren Zeitpunkt erläutert wird.

Nach englischsprachigen Veröffentlichungen wurde mit dem Suchbegriffen „Lot Size Planning“, „Lot Sequence Planning“, „Lot Size Optimization“, „Lot Sequence Optimization“, „Batch Production“, „Semi-Continuous Production“ und „Hybrid Manufacturing (System)“ gesucht (siehe dazu Abbildung 10).



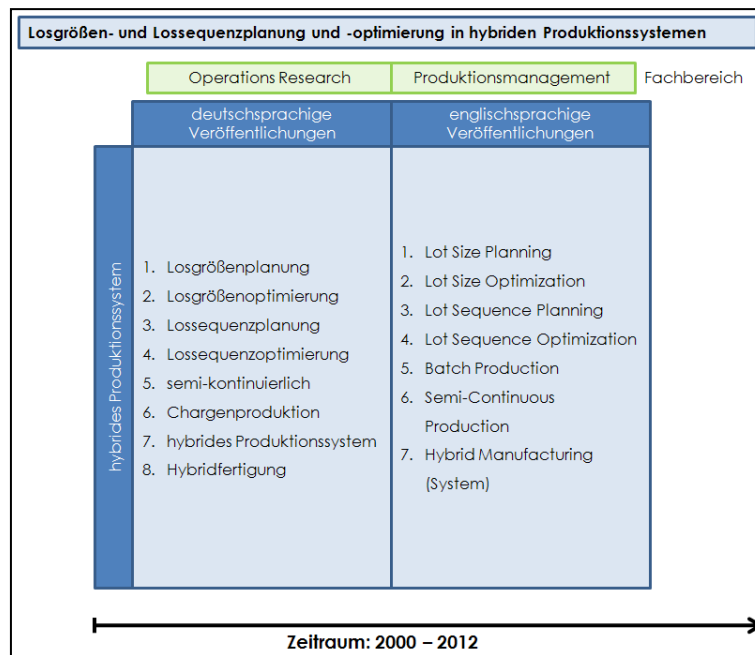


Abbildung 10: Suchbegriffe - zweiter Teil der Literaturstudie<sup>108</sup>

Auffallend bei der Suche nach Veröffentlichungen zu dieser Thematik ist die Tatsache, dass eine große Anzahl an englischsprachigen Artikeln zur Maschinenbelegungsplanung in hybriden Produktionssystemen existiert (siehe dazu Abbildung 11). Die von Ribas, Leisten und Framiñan<sup>109</sup> Ende 2010 erschienene Veröffentlichung „*Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective*“ liefert einen umfangreichen Überblick über die zur Maschinenbelegungsplanung in hybriden Produktionssystemen erschienenen Artikel. Darin nehmen die Autoren eine Klassifizierung englischsprachiger Paper nach den dabei betrachteten Zielgrößen und verwendeten Lösungsverfahren vor. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Mehrheit der Artikel die Maschinenbelegungsplanung zur Minimierung der Durchlaufzeit durch Anwendung eines Algorithmus (mehrerheitlich Branch-and-Bound Algorithmen und Mixed Integer Programmierung) fokussieren und kaum Veröffentlichungen hinsichtlich der Maschinenbelegungsplanung zur termin-treuen Produktion existieren. Ebenso verweisen die Autoren auf die Tatsache, dass bei der Planung der Maschinenbelegung in hybriden Produktionssystemen meist nur eine Zielgröße und keine Berücksichtigung mehrerer Kriterien erfolgt.<sup>110</sup> Dies kann auch durch die einzige gesichtete, deutschsprachige Veröffentlichung – der Dissertation von Acker<sup>111</sup> aus dem Jahr 2010 – worin ein hierarchisches Lösungsverfahren für die mehrstufige Ablaufplanung am Beispiel der Halbleiterindustrie vorgestellt wird, bestätigt werden. Das darin beschriebene Maschinenbelegungsproblem wird durch Anwendung einer Kombination von exakten und heu-

<sup>108</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

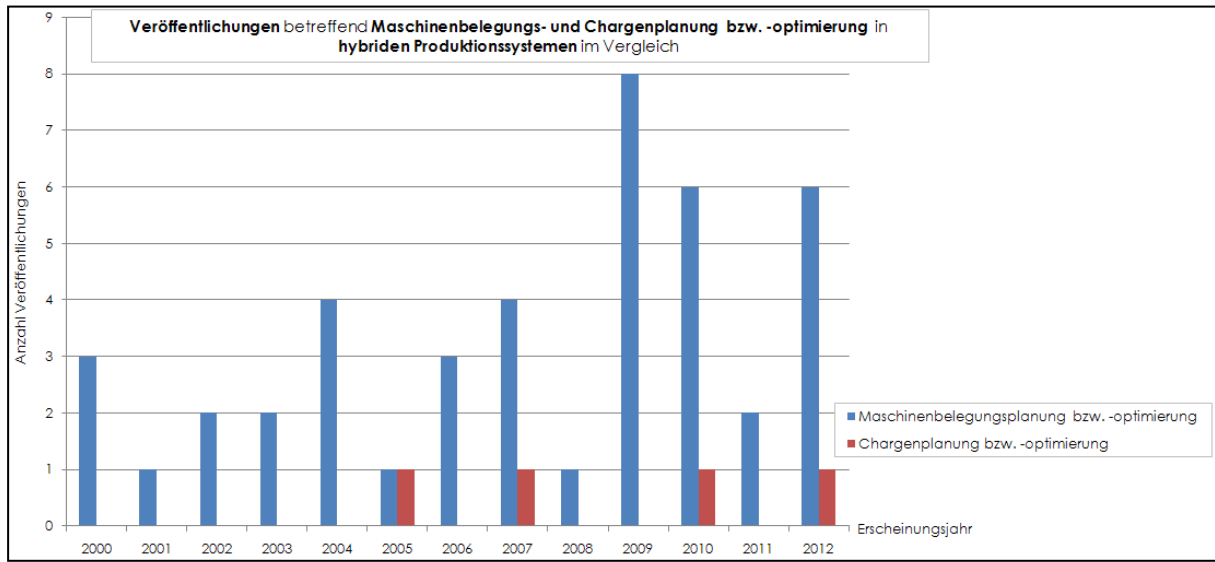
<sup>109</sup> Siehe Ribas et al. (2010), S. 1439 ff.

<sup>110</sup> Vgl. Ribas et al. (2010), S. 1451.

<sup>111</sup> Siehe dazu ausführlich Dissertation Acker (2010).

ristischen Methoden (Simplex-Verfahren und genetischer Algorithmus) mit Fokussierung auf die Zielgröße der Termintreue gelöst.

Die Recherche nach Veröffentlichungen zur Losgrößen-, Chargen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in hybriden Produktionssystemen brachte die Erkenntnis, dass nur eine geringe Anzahl an Publikationen, im Vergleich zu den gesichteten Artikeln zur Maschinenbelegungsplanung in hybriden Produktionssystemen, im Zeitraum von 2000 bis 2012 veröffentlicht wurden (siehe dazu Abbildung 11).



**Abbildung 11: Maschinenbelegungs- und Chargenplanung bzw. -optimierung in der Hybridfertigung<sup>112</sup>**

Die nachfolgende Tabelle 9 gibt einen Überblick der gesichteten, englischsprachigen Artikel zur „Losgrößen-, Chargen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in hybriden Produktionssystemen“.

Artikel dazu konnten im *International Journal of Operational Research (IJOR)*, im *International Journal of Production Economics (IJPE)*, im *European Journal of Operational Research (EJOR)* sowie im *Journal Computers & Operations Research (COR)* gesichtet werden, deren Inhalte nachfolgend erläutert werden.

<sup>112</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

**Tabelle 9: Übersicht englischsprachige Artikel<sup>113</sup>**

| Jahr | Journal | Titel des Artikels  | Thema/Inhalt                                 |
|------|---------|---|--|
| 2005 | IJOR    | Scheduling of continuous and discontinuous material flows with intermediate storage restrictions <sup>114</sup>   | Optimierung der Chargenplanung bzw. -bildung |
| 2007 | IJPE    | Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application <sup>115</sup>  | Optimierung der Chargenplanung bzw. -bildung |
| 2010 | EJOR    | MIP-based decomposition strategies for large-scale scheduling problems in multiproduct multi-stage batch plants: A benchmark scheduling problem of the pharmaceutical industry <sup>116</sup> | Optimierung der Chargenplanung bzw. -bildung |
| 2012 | COR     | A discrete time exact solution approach for a complex hybrid flow-shop scheduling problem with limited-wait constraints <sup>117</sup>  | Optimierung der Chargenplanung bzw. -bildung |

Neumann, Schwindt und Trautmann<sup>118</sup> beschreiben in ihrer Veröffentlichung ein Branch-and-Bound-Verfahren, mit Hilfe dessen die Chargenplanung in einem hybriden Produktionssystem am Beispiel eines Aluminiumherstellers durchgeführt wird. Bei der Planung der Chargen werden jedoch nicht logistische Zielgrößen oder Kostenaspekte fokussiert, sondern die Frage, welche Pufferkapazitäten zur Produktion notwendig sind, beantwortet.

Der Artikel von Voß und Witt<sup>119</sup> beinhaltet die Chargenplanung am Beispiel eines Walzwerkes in der Stahlindustrie. Dabei wird durch die Entwicklung einer Heuristik die Fragestellung beantwortet, wie die Chargenbildung zu erfolgen hat um eine verbesserte Termintreue zu erhalten.

Die Veröffentlichung von Kopanos, Méndes und Puigjaner<sup>120</sup> beschreibt die Anwendung einer Mixed Integer Programmierung zur Optimierung der mehrstufigen Chargenplanung eines Unternehmens in der Pharmaindustrie. Dabei erfolgt die Optimierung der Chargenplanung im Hinblick auf den Work in Progress sowie der zur Verfügung stehenden Lagerkapazitäten.

Im Artikel von Gicquel, Hege, Minoux und van Canneyt<sup>121</sup> wird die Fragestellung wie die Chargenbildung zu erfolgen hat, damit minimale Wartezeiten erreicht werden können, durch die Anwendung einer Mixed-Integer Programmierung beantwortet.

Auch im Zuge dieser Literaturstudie fällt auf, dass alle diskutierten Artikel die Optimierung der Chargenplanung bzw. Chargenbildung durch Anwendung eines Algorithmus hinsichtlich ei-

<sup>113</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>114</sup> Siehe Neumann; Schwindt; Trautmann (2005).

<sup>115</sup> Siehe Voß; Witt (2007).

<sup>116</sup> Siehe Kopanos; Méndes; Puigjaner (2010).

<sup>117</sup> Siehe Gicquel; Hege; Minoux; van Canneyt(2012).

<sup>118</sup> Vgl. Neumann et al. (2005), S. 495 ff.

<sup>119</sup> Vgl. Voß et al. (2007), S. 445 ff.

<sup>120</sup> Vgl. Kopanos et al. (2010), S. 644 ff.

<sup>121</sup> Vgl. Gicquel et al. (2012), S. 629 ff.

ner Zielgröße realisieren. Im Vergleich zur großen Anzahl an Veröffentlichungen betreffend der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Prozess- und Fertigungsindustrie zu jenen betreffend in hybriden Produktionssystemen kann vermutet werden, dass in diesem Bereich noch erheblicher Forschungsbedarf herrscht bzw. muss die Frage, ob die Übertragung der Verfahren zur Losgrößen- und Lossequenzplanung, welche in der Prozess- und Fertigungsindustrie angewandt werden können, auch auf hybride Produktionssysteme möglich ist, beantwortet werden.

### **2.2.3 Losgrößeneinfluss auf logistische Kennlinien**

Der letzte Teil der Literaturstudie bezieht sich auf Veröffentlichungen, welche die Thematik des Losgrößeneinflusses auf logistische Kennlinien und den darin abgebildeten Zielgrößen zum Inhalt haben.

Dazu wurde wiederum getrennt nach deutsch- und englischsprachigen Veröffentlichungen in den in Abbildung 3 angeführten Journals sowie dem *Onlinekatalog für Dissertationen und Habilitationen* gesucht.

Die Suche nach deutschsprachigen Veröffentlichungen wurde durch die Eingabe der Schlagworte „Losgröße“, „logistische Kennlinien“, „logistische Zielgrößen“, sowie „Losgrößeneinfluss“ vorgenommen. Diese Recherche brachte das Ergebnis, dass kein deutschsprachiger Artikel im Zeitraum von 2000 bis 2012 gefunden wurde, welcher sich mit der Thematik des Einflusses der Produktionslosgröße auf die logistischen Zielgrößen befasst.

Weiters wurde im *Onlinekatalog für Dissertationen und Habilitationen* die Dissertation von Wachsmann<sup>122</sup> (siehe Tabelle 10 auf Seite 31) gesichtet, welche vorrangig die kennliniengestützte Simulation von Logistikprozessen mittels der Simulationssoftware Plant Simulation zum Inhalt hat. Der Autor beschäftigt sich in seiner Arbeit u.a. auch mit dem Einfluss der Losgröße auf die logistischen Kennlinien, wobei dieser aber lediglich auf die Tatsache verweist, dass mitunter durch die Verringerung der Losgröße eine Harmonisierung in den Auftragszeiten erzielt werden kann.

Im Anschluss daran folgte die Suche nach englischsprachigen Veröffentlichungen betreffend den Losgrößeneinfluss auf logistische Kennlinien bzw. Zielgrößen. Bei der Suche nach englischsprachigen Veröffentlichungen wurden die Datenbanken „Emerald“, „Science Direct“ und „Scopus“ nach den Schlagwörtern „Lot Size(ing)“, „Lot Size Influences“, „Logistic Operating Curves“ und „Logistic Objectives“ untersucht. Die Recherche bezog sich dabei auf die Begriffe im Titel, der Kurzfassung und den Schlagwörtern der Artikel. Relevante Suchergebnisse dazu konnten im *International Journal for Production Economics (IJPE)*, im *International Journal of*

---

<sup>122</sup> Vgl. Wachsmann (2006), S. 61 ff.

*Production and Performance Management (IJPPM)*, im *Annals of Operations Research (AOR)* und in der *Zeitschrift für Betriebswirtschaft (ZfB)* gesichtet werden.

Tabelle 11 auf Seite 31 gibt einen Überblick über die Suchergebnisse zur englischsprachigen Literaturstudie, deren Inhalte nachfolgend erläutert werden:

Lutz, Lödding und Wiendahl<sup>123</sup> stellen in ihrer Veröffentlichung ein Modell vor, welches die zielgrößenorientierte Kontrolle von Logistikprozessen im Hinblick auf das Bestandsmanagement ermöglicht. Dies wird durch die Verwendung von Kennlinien, welche die Beziehung zwischen dem Bestandslevel und dem Servicelevel darstellen, erreicht. Durch die Modifizierung der veränderbaren Parameter des Modells (z.B. Bestellmengen, Bestände) kann eine Verbesserung in der Liefertreue erreicht werden.

Die Veröffentlichung von Nyhuis und Vogel<sup>124</sup> hat die Adaptierung der logistischen Kennlinien zur Beschreibung des Verhaltens einer sortenreinen Fließfertigung zum Inhalt. Die darin vorgestellte modellbasierte Methode beschreibt mathematisch die Beziehung zwischen Liefertreue und dem mittleren Work in Progress (WIP) in einem Arbeitssystem mit kontinuierlicher Fertigung. Weiters wird die Möglichkeit zur Identifizierung von Engpässen und der Optimierung von logistischen Zielgrößen durch Anwendung des entwickelten Modells erläutert.

Pahl, Voß und Woodruff<sup>125</sup> stellen in ihrem Artikel verschiedene Produktionsplanungskonzepte vor, in welchen anhand von Warteschlangenmodellen die Analyse des Zusammenhangs zwischen Bestand, Auslastung und Termintreue diskutiert wird. Weiters geben diese einen Überblick über jene Artikel, welche den nichtlinearen Zusammenhang zwischen dem Work in Progress (WIP) und der Auslastung eines Arbeitssystems anhand von Kennlinien beschreiben. Ergänzend weisen diese darauf hin, dass auch andere Faktoren wie beispielsweise der Produktmix, die Los- und/oder Chargengröße, Nachfrageschwankungen etc. eine wesentliche Rolle bei der Produktionsplanung spielen und daher um eine wettbewerbsfähige Produktion realisieren zu können, in der Planung und Steuerung von Produktionsprozessen Berücksichtigung finden müssen.

Stadler<sup>126</sup> erörtert in seiner Veröffentlichung die Tatsache, dass relativ kleine Abweichungen von der wirtschaftlichen Losgröße zu marginal höheren Rüst- und Lagerkosten führen. Dieses Ergebnis ist noch weit ausgeprägter, wenn als Bezugsgröße nicht nur die Rüst- und Lagerkosten, sondern die gesamten variablen Kosten in Betracht gezogen werden. Der Autor beschreibt die Herleitung einer Formel, welche das Ausmaß zulässiger Abweichungen von der wirtschaftlichen Losgröße bei einer vorgegebenen relativen Erhöhung der gesamten variablen Kosten aufzeigt. Ebenso wurde von ihm der Begriff der Losgrößenflexibilität definiert, welche die Breite des Intervalls beschreibt, innerhalb dessen die Reichweite eines Loses variiert

---

<sup>123</sup> Vgl. Lutz et al. (2003), S. 217 ff.

<sup>124</sup> Vgl. Nyhuis et al. (2006), S. 284 ff.

<sup>125</sup> Vgl. Pahl et al. (2007), S. 297 ff.

<sup>126</sup> Vgl. Stadler (2007), S. 406 ff.

werden kann, ohne eine vorgegebene relative Kostenerhöhung zu überschreiten. Die Losgrößenflexibilität ist umso größer, je kleiner die optimale Reichweite eines Artikels ist. Zur Bestimmung der Losgröße in der industriellen Praxis werden in der Veröffentlichung zwei Schlussfolgerungen angestellt: Zum einen sollte den Disponenten keine feste Losgröße (auf Grundlage der wirtschaftlichen Losgröße) vorgegeben werden, da die gesamten variablen Kosten nur geringfügig ansteigen, wenn von der optimalen Reichweite abgewichen wird. Zum anderen wird darauf verwiesen, dass die Verwendung der wirtschaftlichen Losgröße keinen Hebel darstellt, welcher zu erheblichen Kosteneinsparungen führt. Vielmehr haben Untersuchungen gezeigt, dass durch die Verringerung der anfallenden Rüstkosten kürzere, optimalere Reichweiten und eine höhere Losgrößenflexibilität erreicht werden können.

Aufgrund der geringen Anzahl an gesichteten Publikationen, welche die Beschreibung bzw. Bestimmung des Einflusses der Produktionslosgröße auf logistische Kennlinien untersuchen bzw. diskutieren, kann auch hierbei unterstellt werden, dass diesbezüglich noch Forschungsbedarf herrscht.

**Tabelle 10: Übersicht Dissertationen II<sup>127</sup>**

| <b>Jahr</b> | <b>Titel der Dissertation</b>  | <b>Thema/Inhalt</b>                          |
|-------------|--|--|
| 2006        | Kennliniengestützte Durchführung von Logistiksimulationen <sup>128</sup> | Losgrößeneinfluss auf logistische Kennlinien |

**Tabelle 11: Auszug englischsprachige Artikel II<sup>129</sup>**

| <b>Jahr</b> | <b>Journal</b> | <b>Titel des Artikels</b>  | <b>Thema/Inhalt</b>                        |
|-------------|----------------|--|--|
| 2003        | IJPE           | Logistics-oriented inventory analysis <sup>130</sup>                                   | Lot Size Influences on Inventory           |
| 2006        | IJPPM          | Adaptation of logistic operating curves to one-piece flow processes <sup>131</sup>     | Logistic Operating Curves (WIP, inventory) |
| 2007        | AOR            | Production planning of load dependent lead times: an update of research <sup>132</sup> | Lot Size Influence on Process Performance  |
| 2007        | ZfB            | How important is to get the lot size right? <sup>133</sup>                             | Lot Size Influences on Process Performance |

<sup>127</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>128</sup> Siehe Wachsmann (2006).

<sup>129</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>130</sup> Siehe Lutz; Lödding; Wiendahl (2003).

<sup>131</sup> Siehe Nyhuis; Vogel (2006).

<sup>132</sup> Siehe Pahl; Voß; Woodruff (2007).

<sup>133</sup> Siehe Stadler (2007).

## 2.3 Forschungslücke

Der erste Teil der Literaturstudie setzt sich mit Publikationen betreffend Verfahren zur Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Prozess- und Fertigungsindustrie auseinander. Diese ließ den Schluss zu, dass im Bereich der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in der Fertigungsindustrie bis dato mehr geforscht wurde als im Bereich der Prozessindustrie und die gesichteten Modelle und Verfahren im Laufe ihrer Entwicklung immer mehr der bei der Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung zu berücksichtigenden Aspekte beinhalteten bzw. um diese ergänzt wurden. Jedoch zeichnet sich der Trend ab, dass gerade in den letzten Jahren vermehrt diese Thematik auch in der Prozessindustrie betrachtet wurde. Klar ersichtlich ist, dass im Bereich des „Operations Research“ weitaus mehr Publikationen dazu veröffentlicht wurden, als im Bereich des „Produktionsmanagements“. Ebenso konnte aufgezeigt werden, dass alle gesichteten Publikationen mit algorithmischen Verfahren zur Analyse und/oder Optimierung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung hinsichtlich einer logistischen Zielgröße oder kostenspezifischen Aspekten in Zusammenhang stehen. Zur Kontrolle der Zielerreichung bzw. zur Messung des Erfolges des angewandten Verfahrens wurde immer ein Zielwert verwendet. Tatsache ist auch, dass bei der Losgrößen- und Lossequenzplanung bis dato kostenspezifische Überlegungen vorrangig waren, eine Tendenz zur Fokussierung der Termintreue bei der Planung bzw. Optimierung zeichnet sich jedoch ab. Eine Betrachtung aller logistischen Zielgrößen wurde aber kaum durchgeführt, ebenso fand die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Zielgrößen und die Beeinflussung kostenspezifischer Aspekte nicht zur Genüge statt, was Potenzial zur Weiterentwicklung birgt. Eine wesentliche Erkenntnis, welche aus der Recherche hervor geht, ist die Tatsache, dass im Bereich der Losgrößen- und Lossequenzplanung in der Prozessindustrie und im Fachbereich des Produktionsmanagements aufgrund der geringen Anzahl an gefundenen Veröffentlichungen hinsichtlich der Fokussierung logistischer Zielgrößen noch Forschungsbedarf herrscht.

Im zweiten Teil der Literaturstudie wurde nach Publikationen betreffend der Losgrößen- und Lossequenzplanung in hybriden Produktionssystemen gesucht. Diese ließ den Schluss zu, dass kaum Veröffentlichungen dazu existieren. Hingegen konnte eine Vielzahl an Artikeln, welche sich mit der Maschinenbelegungsplanung in hybriden Produktionssystemen beschäftigt, gesichtet werden, was darauf hin deutet, dass diese Fragestellung bis dato vermehrt im Fokus der Betrachtung stand. Auf die entscheidende Frage, ob die bekannten Verfahren der Losgrößen- und Lossequenzplanung, welche in der Prozess- und Fertigungsindustrie angewandt werden, auch auf hybride Produktionssysteme übertragbar sind, konnte jedoch keine Antwort gefunden werden.



Im letzten Teil der Literaturstudie wurde ein Überblick über die Publikationen zum Thema „Losgrößeneinfluss auf logistische Kennlinien bzw. Zielgrößen“ gegeben. Dabei wurde festgestellt, dass man sich mit der allgemeinen Darstellung und Bewertung des Losgrößeneinflusses auf logistische Kennlinien und der Abbildung des Zusammenhanges der logistischen Zielgrößen hinsichtlich kostenspezifischer Aspekte kaum beschäftigt hat. Lediglich fünf Artikel konnten dazu gesichtet werden. Geprägt ist diese Thematik vor allem von den Begründern der Kennlinientheorie, Nyhuis und Wiendahl, jedoch existieren auch andere Ansätze, in welchen unter Zuhilfenahme von Wartschlangenmodellen die Wirkungszusammenhänge logistischer Zielgrößen beschrieben und erläutert werden. Der relevanteste, gesichtete Artikel stammt von Nyhuis und Vogel<sup>134</sup>, welcher die Adaptierung der logistischen Kennlinien zur Beschreibung des Verhaltens einer sortenreinen Fließfertigung zum Inhalt hat. Eine Antwort auf die Frage, wie sich der Einfluss der Produktionslosgröße auf die logistischen Kennlinien bzw. den darin abgebildeten Zielgrößen auswirkt, wird aber nicht gegeben. Es existiert in der Literatur auch keine Veröffentlichung zur Darstellung, Bewertung sowie Verbesserung der Losgrößeneinflussnahme auf das Leistungsverhalten einer Produktion am Beispiel eines Kupferhüttenwerks, wo der Übergang von einer kontinuierlichen auf eine diskrete Fertigung auftritt. All diese Kritikpunkte sind ein Indiz dafür, dass im Bereich der Darstellung, Bewertung und Handhabung des Losgrößeneinflusses auf die logistischen Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem noch Forschungsbedarf herrscht.

Die Frage wie also die Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung in einem hybriden Produktionssystem zu erfolgen hat, ob die Übertragung der bereits existierenden Verfahren zur Losgrößen- und Lossequenzplanung bzw. -optimierung der Prozess- und Fertigungsindustrie auf dieses Produktionssystem möglich ist und wie die Darstellung, Beschreibung und Bewertung des Losgrößeneinflusses auf die logistischen Zielgrößen zu erfolgen hat, damit die Wirkungszusammenhänge dargestellt und analysiert werden können, um darauf aufbauend ein Konzept, welches die Abstimmung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf logistische Zielgrößen und kostenspezifische Aspekte gleichermaßen fokussiert, zu realisieren, bleibt unbeantwortet.

Weiters konnte durch eine Expertenbefragung die Losgrößenplanung in der Hybridfertigung als bis dato kaum erforschtes Gebiet bestätigt werden. Da aber gerade beim Übergang von einer kontinuierlichen Fertigung, bei welcher meist keine Losgrößenplanung zum Einsatz kommt da mit der Losgröße eins bzw. unendlich gefertigt wird, auf eine diskrete Fertigung, bei welcher sehr wohl Losgrößenplanungsverfahren zum Einsatz kommen erhebliche Komplikationen (siehe dazu Abschnitt 2.4) auftreten, stellt die Bestimmung und Bewertung des Einflusses der Produktionslosgröße an dieser Schnittstelle ein erhebliches Forschungspotenzial sowohl in

---

<sup>134</sup> Siehe Nyhuis und Vogel (2006).

der Wissenschaft, zugleich aber auch einen dringenden Handlungsbedarf in der betrieblichen Praxis, dar.

## 2.4 Relevanz der Thematik für die betriebliche Praxis

In diesem Abschnitt wird die thematische Relevanz dieser Dissertation für die betriebliche Praxis erläutert. Zielsetzung dieser Arbeit ist zum einen die Ausarbeitung eines Beschreibungs- und Erklärungsmodells, mit Hilfe derer es zukünftig für Produktionsunternehmen mit Hybridfertigung möglich ist, Wirkungszusammenhänge und Einflüsse zwischen der im Unternehmen angewandten Losgrößen- und Reihenfolgeplanung und dem Leistungs- und Kostenverhalten der Produktion einfacher aufgrund der veranschaulichenden Darstellung zu erkennen und dementsprechend daraus Schlüsse zu ziehen. Andererseits stellen das entwickelte Vorgehenskonzept und der darin enthaltene Abstimmungsalgorithmus ein Instrumentarium zur Verbesserung der Abstimmung des Losgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf das Leistungs- und Kostenverhalten der Produktion dar. Damit kann bei Anwendung dessen, eine positive Beeinflussung in der Harmonisierung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung im Hinblick auf die logistischen als auch monetären Zielgrößen erreicht werden. Aufgrund der Tatsache, dass bei der Ausarbeitung sowohl der Modelle als auch des Vorgehenskonzepts eine ganzheitliche Betrachtung der Einflussfaktoren erfolgt, kann sichergestellt werden, dass sowohl kostenspezifische Überlegungen (fließen in Rüstkosten ein), als auch eine Verbesserung der logistischen Zielindikatoren (Bestand, Leistung, Durchlaufzeit und Termintreue) erreicht wird. Darüber hinaus beziehen sich die Betrachtungen nicht nur auf ein Arbeitssystem, sondern auf mehrere aufeinanderfolgende Arbeitssysteme, womit die Ergebnisse dieser Dissertation einen ganzheitlichen Verbesserungsansatz darstellen.

Wie in Abschnitt 2.3 bereits angeführt wurde, konnte durch eine Expertenbefragung (mit Verantwortlichen der Produktionsplanung und -steuerung in Unternehmen der Hütten- und Grundstoffindustrie) mittels Interviews die Losgrößenplanung an der Schnittstelle bzw. dem Übergang von einer kontinuierlichen auf eine diskrete Fertigung, wie es z.B. in einem Stahlwerk, wo der Übergang vom kontinuierlichen Stahlguss zum diskontinuierlichen Walzprozess der Halbzeuge erfolgt oder in einer Gießerei eines Hüttenwerkes, wo der Übergang vom kontinuierlichen Kupferaufschmelzungsprozess zum diskontinuierlichen Prozess des Stranggusses auftritt, als eindeutige Problemstelle in der betrieblichen Praxis identifiziert werden. Die Problematiken, welche sich in der betrieblichen Praxis abzeichnen, sind in Tabelle 12 aufgelistet. Hervorgehoben sind hierbei die Problemstellungen betreffend der Losgrößenplanung. Ermittelt wurden diese, wie bereits erwähnt, durch die qualitative Befragung von Vertretern aus der Industrie, im Zuge derer die Experten die herrschenden Problematiken in ihrem Unternehmen darstellten. Die offene Form des Interviews wurde deshalb gewählt, da hierbei keine Beantwortung konkreter Fragestellungen eingefordert wird, sondern durch das freie Referie-

ren des Interviewten weitläufigere Antworten zu einer betreffenden Thematik im Vergleich zu einem geschlossenen Interview erhalten werden können. Dies ist notwendig, um nicht schon im Vorhinein ein nicht identifiziertes Problem zu vernachlässigen.<sup>135</sup> Aufbauend auf die ermittelten Problemstellungen erfolgte die Auswertung der durchgeführten Gespräche.

**Tabelle 12: Auflistung - Problematiken in betrieblicher Praxis<sup>136</sup>**

| <b>Auswertung Problematiken in der betrieblichen Praxis</b> |  |
|---|--|
| <i>Probleme hinsichtlich des</i>                            |  |
| <b>Materialflusses</b>                                      | Notwendigkeit von Zwischenaggregaten<br>Stillstand bewirkt kompletten Produktionsausfall<br>unterschiedliche Kapazitäten der Aggregate<br>ablaufbedingte Pufferbestände (durch Umreihung von Aufträgen vor Aggregaten)<br>Tendenz zu längeren Durchlaufzeiten<br>starke Streuung der Übergangszeiten zwischen Aggregaten<br>Schwankung der Arbeitsvorräte vor Aggregaten |
| <b>Informationsflusses</b>                                  | eindeutige Produktzuordnung schwer möglich<br>aufwendiger Informationsfluss (da eine Vielzahl von Kriterien berücksichtigt werden müssen)<br>hohe Anzahl an unterschiedlichen Planungssystemen<br>kein durchgängiges Planungs- und Steuerungssystem einsetzbar   |
| <b>Losgrößenplanung</b>                                     | terminkritische und/oder kleine Losgrößen schwer planbar<br>geringe Flexibilität in Losgrößenplanung<br>hoher Zeitaufwand durch manuelle Planung<br>unterschiedlichste Kriterien für optimale Losgröße je Aggregat<br>Einfluss der Produktionslosgrößen nicht hinreichend bekannt bzw. vorhersehbar<br>keine Empfehlungen für Vorgehensweise zur Bündelung von Aufträgen |
| <b>Produktionsprogrammplanung</b>                           | starke Abhängigkeiten von Anlagenverfügbarkeit<br>kurzfristige Produktionsänderungen schwer realisierbar<br>vielschichtige Produktionsrestriktionen vorhanden<br>hohe Komplexität der Fertigungsplanung<br>Auftragseingangsmix bewirkt ständige Änderung der Engpassaggregate<br>Arbeitsschritte verlangen eine kapazitive und terminliche Betrachtung                   |

Im Anschluss an die Erhebung der Problematiken seitens der betrieblichen Praxis erfolgte die Auswertung der Experteninterviews auf Basis einer Häufigkeitsanalyse, im Zuge derer die Häufigkeit der Nennungen in den durchgeführten Interviews ausgewertet wurde (siehe dazu Abbildung 12).<sup>137</sup>

<sup>135</sup> Vgl. Bortz (2006), S. 283 ff.

<sup>136</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>137</sup> Siehe Bortz (2006), S. 151.

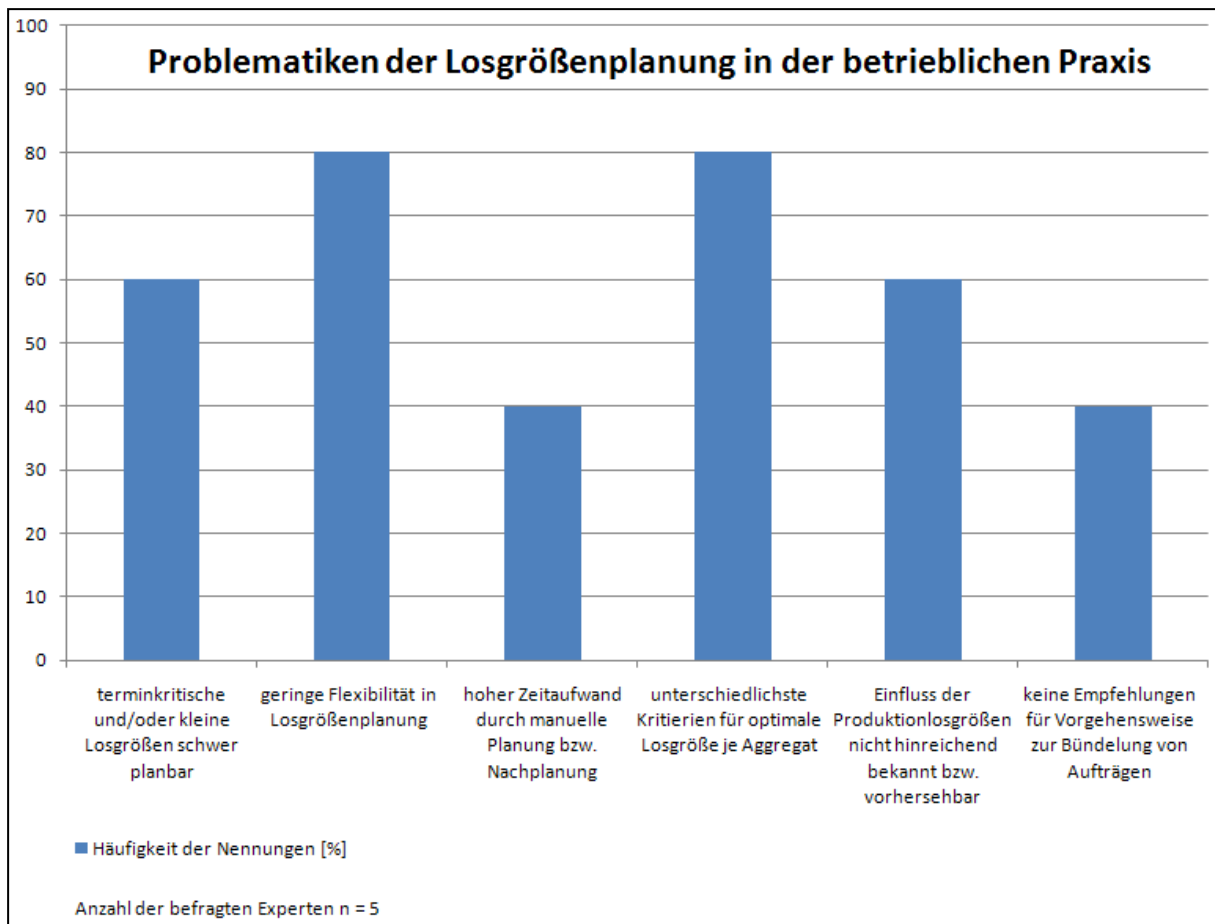


Abbildung 12: Auswertung Expertenbefragung<sup>138</sup>

Von den befragten Unternehmen (siehe dazu Anhang A)<sup>139 140</sup>, welche ein hybrides Produktionssystem aufweisen, nannten 60% der Experten die Tatsache, dass terminkritische bzw. kleine Produktionslosgrößen schwer planbar sind und aufgrund der geringen Flexibilität der Losgrößenplanung bei einer hybriden Fertigung, welche 80% der Befragten bestätigten, nur mit einem dementsprechend hohen Aufwand realisierbar sind. 40% sehen den Zeitaufwand, welcher mit der manuellen Planung bzw. Nachplanung der Losgrößenplanung verbunden ist, als problematisch. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Kriterien zur Bestimmung der „optimalen Produktionslosgröße“ je Aggregat stark unterscheiden (von 80% der Befragten angegeben), ist der Einfluss der Produktionslosgröße hinsichtlich der Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen des gesamten Produktionssystems oftmals nicht hinreichend bekannt bzw. schwierig abschätzbar (von 60 % der befragten Unternehmen bestätigt). 40% gaben an, dass es in ihrem Unternehmen keine Empfehlungen bzw. eine standardisierte Vorgehensweise zur Bündelung von Aufträgen bzw. zur Bestimmung der Produktionslosgröße gibt.

Die durch die Expertenbefragung gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der herrschenden Problematiken bei der Losgrößenplanung in der betrieblichen Praxis führten zu dem Schluss,

<sup>138</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>139</sup> Siehe dazu Anhang A, S. 280.

<sup>140</sup> Befragte Unternehmen bzw. Personen sind dem Lehrstuhl für Industrielogistik bekannt und Gesprächsprotokolle liegen dort auf.

dass die im Rahmen dieser Dissertation behandelten Fragestellungen sowie die darin entwickelten Instrumentarien einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Situation betreffend der Losgrößenplanung in Unternehmen leisten können. Die aus den durchgeführten Interviews resultierenden Ergebnisse bestätigen somit die Relevanz und Notwendigkeit dieser Arbeit für die betriebliche Praxis.

Im Anschluss erfolgt nun die Vorstellung der aus den Abschnitten 2.3 und 2.4 resultierenden Forschungsfragen und Zielsetzungen der Arbeit.

## 2.5 Forschungsfragen und Zielsetzungen der Arbeit

Um die Ziele dieser Arbeit zu definieren werden nun die wissenschaftliche Kernforschungsfrage und die daraus abgeleiteten Teilfragen formuliert. Diese sind in den aus der Literatur abgeleiteten Fragestellungen und der Notwendigkeit in der betrieblichen Praxis begründet.

### **Wissenschaftliche Kernforschungsfrage:**

*Durch welche Modelle und Vorgehensweise kann der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf logistische Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem abgebildet, bewertet und positiv gelenkt werden?*

### **Aus der Kernforschungsfrage resultierende Teilfragen:**

1. *Welche Verfahren der mehrstufigen Abstimmung zwischen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf logistische Zielgrößen gibt es bereits und welche Schwachstellen bzw. Restriktionen weisen diese Verfahren auf?*
2. *Durch welche Besonderheiten sind Produktionsabläufe in hybriden Produktionssystemen charakterisiert?*
3. *Inwieweit können die bestehenden Ansätze der Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung auf hybride Produktionssysteme übertragen werden bzw. gibt es durchgängig einsetzbare Ansätze?*
4. *Welche Elemente muss ein Modell zur Darstellung der Wirkungszusammenhänge und Einflussnahme der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf logistische Zielgrößen enthalten?*
5. *Welche Elemente muss ein Vorgehenskonzept zur Abstimmung der Produktionslosgröße und Reihenfolge sowohl auf logistische als auch monetäre Zielgrößen enthalten, um die wissenschaftliche Kernforschungsfrage zu beantworten?*
6. *Welche Struktur muss ein Modell zur Verbesserung der anwendungsorientierten Abstimmung zwischen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung und den Zielgrößen in der Hybridfertigung aufweisen?*

7. Auf welche Produktionssysteme können die entwickelten Modelle und das Vorgehenskonzept übertragen werden?

## 2.6 Forschungsdesign

In diesem Unterkapitel wird ein Überblick über das Forschungsdesign, welches dieser Dissertation zugrunde liegt, gegeben.

### 2.6.1 Darstellung der Vorgehensweise

Forschung kann generell in die Bereiche *Grundlagenforschung*, welche als theoretisch wissenschaftliche Disziplin bezeichnet wird, und *angewandte Forschung* eingeteilt werden. Die wesentlichen Unterschiede dieser beiden Forschungsbereiche bestehen in der Aufgabenstellung und Durchführung von Forschungsprojekten und werden nachfolgend erläutert:<sup>141</sup>

- *Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse*: Die Grundlagenforschung hat die allgemeine Beschreibung und Erklärung von Sachverhalten und Zusammenhängen zum Inhalt. Die angewandte Forschung hingegen zielt auf Ergebnisse ab, welche unmittelbar in der Praxis Anwendung finden.
- *Begründung der Relevanz*: Die Relevanz der Grundlagenforschung wird wissenschaftsimmanent z.B. durch das Aufzeigen von Forschungslücken im bisherigen Wissenschaftsstand, begründet. Diese hat vor allem die Frage nach der Gültigkeit von theoretischen Entwürfen und allgemein gehaltenen Hypothesen zum Inhalt. Im Gegensatz dazu stehen die Frage- und Problemstellungen der angewandten Forschung, welche sich direkt aus der betrieblichen Praxis und deren Herausforderungen ableiten lassen. Die angewandte Forschung ist daher auf die Anwendbarkeit von Modellen in der Praxis ausgerichtet.
- *Rechtfertigung der Forschungsergebnisse*: Die Grundlagenforschung fokussiert die absolute wissenschaftliche Durchführung, wobei die Ergebnisse und Vorgehensweisen vor Vertretern der Wissenschaft durch das Nachweisen und Einhalten von gültigen wissenschaftlichen Standards gerechtfertigt werden. In der angewandten Forschung müssen hingegen Anforderungen aus der betrieblichen Praxis Berücksichtigung finden. Daher steht bei der Beurteilung der Forschungsergebnisse die unmittelbare Brauchbarkeit der Ergebnisse in der Praxis im Vordergrund.

Diese Arbeit lässt sich dem Bereich der anwendungsorientierten Forschung zuordnen. Diese verfolgt das Ziel, den verantwortlichen Vertretern in der logistikbezogenen Praxis für ihre Zwe-

---

<sup>141</sup> Vgl. Kromrey (1998), S. 19 f.

cke nützliche Ergebnisse bereitzustellen, anhand derer die Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeward auf logistische Zielgrößen bewert- und durchführbar ist.

Die Vorgehensweise des Erkenntnisgewinns ist eine deduktiv-induktive. Inhalt der deduktiven Methode ist die Ableitung rein logisch bestimmter Relationen, d.h. es wird von einem allgemein gültigen Zustand auf etwas Besonderes geschlossen.<sup>142</sup> In der vorliegenden Dissertation werden sowohl das Bewertungsinstrumentarium als auch das Vorgehenskonzept zur Abstimmung der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem, als auch die Anforderungen an das Simulationsmodell und die VBA-Skripten zur Bewertung und Verbesserung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen aus der Literatur abgeleitet, wodurch eine Deduktion gegeben ist. Die induktive Methode hingegen versucht, aus einer Vielzahl an Einzelbeobachtungen typische Merkmale, Beziehungen und Regelmäßigkeiten abzuleiten. Hierbei wird versucht aus dem Einzelnen auf das Allgemeine zu schließen.<sup>143</sup> In der vorliegenden Arbeit kam diese durch die Gewinnung von Erkenntnissen beruhend auf einem konkreten Fallbeispiel aus der betrieblichen Praxis zur Anwendung.

## 2.6.2 Qualitative Datenerhebung

Um die Charakterisierung eines hybriden Produktionssystems vornehmen, sowie die in der betrieblichen Praxis herrschenden Probleme und Restriktionen bei der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung ermitteln zu können, wird die Methode der qualitativen Datenerhebung gewählt. Diese erlangt ihre Erkenntnisgewinne aufgrund der Interpretation von Beschreibungen der Erfahrungsrealität. Bei diesem Ansatz erfolgen die Verbalisierung von Erfahrungswerten und die interpretative Auswertung dieser.<sup>144</sup> Zu den wichtigsten Methoden der qualitativen Datenerhebung zählen die qualitative Befragung und Beobachtung, welche nachfolgend erläutert werden.

### **Qualitative Befragung:**

Gekennzeichnet ist diese durch das offene Interview. Hierbei erfolgt keine Strukturierung der Befragung durch den Interviewer, dieser gibt lediglich ein Rahmenthema vor über welches der Befragte referieren soll. Diese Art der Befragung erfolgt in den meisten Fällen mündlich.<sup>145</sup>

Die qualitative Befragung wurde mitunter im Rahmen der Ermittlung der Relevanz der Themenstellung für die betriebliche Praxis, die Beschreibung des Produktionssystems, der Definition der Problemstellung am Beispiel einer Kupferhütte und der Interpretation der Simulationsergebnisse (siehe dazu Kapitel 5) eingesetzt. Die Informationen wurden im Zuge von Gruppengesprächen als auch in Einzelinterviews erarbeitet.

---

<sup>142</sup> Vgl. Chalmers (2001), S. 35 f.

<sup>143</sup> Vgl. Chalmers (2001), S. 39 ff.

<sup>144</sup> Vgl. Bortz et al. (1995), S. 271.

<sup>145</sup> Vgl. Bortz et al. (1995), S. 283 ff.

### **Qualitative Beobachtung:**

Die qualitative Beobachtung ist durch die folgenden Merkmale gekennzeichnet:<sup>146</sup>

- Beobachtung direkt vor Ort,
- aktive Einbeziehung des Beobachters in das Tagesgeschäft,
- die Inhalte der Beobachtung spiegeln äußeres Verhalten sowie latente Motivations- und Bedeutungsstrukturen wider,
- keine Festlegung auf einen bestimmten Beobachtungsbereich.

Die qualitative Beobachtung beinhaltet die Methodiken der Feldbeobachtung, des Rollenspiels, der Einzelfallbeobachtung oder der Selbstbeobachtung, wobei erstere die bedeutendste Ausprägung der qualitativen Beobachtung darstellt.<sup>147</sup> Im Mittelpunkt der Feldbeobachtung steht die teilnehmende Beobachtung, welche es dem Beobachter ermöglicht nicht nur das Fremdverhalten zu begutachten, sondern auch selbst Erfahrungen durch die aktive Teilnahme am Tagesgeschäft zu sammeln.<sup>148</sup>

Die qualitative Beobachtung wurde – zusätzlich zur qualitativen Befragung – während der Entwicklung des Simulationsmodells und der VBA-Skripten für die Gießerei eines Hüttenwerkes (siehe Kapitel 5) durchgeführt. Dabei konnte die Autorin unter Zuhilfenahme der Methodiken der qualitativen Beobachtung Erfahrungen hinsichtlich der im Unternehmen herrschenden Gegebenheiten und den damit verbundenen Herausforderungen sammeln.

### **2.6.3 Quantitative Datenauswertung**

Der quantitative Ansatz der Datenauswertung hat die statistische Auswertung der Beobachtungsrealität zum Inhalt.<sup>149</sup> Als quantitative Methoden werden alle Vorgehensweisen, die zur numerischen Darstellung empirischer Sachverhalte dienen, verstanden.<sup>150</sup> Dabei erfolgen die Auszählung von Merkmalen und die Berechnung statischer Kennzahlen (z.B. Streuungsmaße). Zur quantitativen Datenauswertung zählen statistische Tests und Zusammenhangsanalysen wie beispielsweise Korrelations-, Regressions- oder Kontingenzanalysen.<sup>151</sup> Die quantitative Auswertung kam bei der Verifizierung und Validierung in Kapitel 5 zum Einsatz.<sup>152</sup>

Bei der Verifizierung werden die entwickelten Modelle Testläufen unterzogen, in welchen überprüft wird, ob das logische Modellverhalten den Erwartungen entspricht.<sup>153</sup>

---

<sup>146</sup> Vgl. Bortz et al. (1995), S. 297 f.

<sup>147</sup> Vgl. Bortz et al. (1995), S. 297 f.

<sup>148</sup> Vgl. Friedrichs (1985), S. 288.

<sup>149</sup> Vgl. Bortz et al. (1995), S. 271.

<sup>150</sup> Vgl. Raab-Steiner et al. (2008), S.43.

<sup>151</sup> Vgl. Rasch et al. (2010), S. 119 ff.

<sup>152</sup> Zur Verifizierung und Validierung siehe ausführlich Abschnitt 3.5.1.2.

<sup>153</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 136.



Die Validierung bestehender Systeme kann entweder als Plausibilitätsuntersuchung mit relativ geringem Aufwand oder durch statistische Vergleichstests mit größerem Aufwand und entsprechend höherer Sicherheit durch einen Input-/Output-Vergleich der Modelle mit realen Betriebsdaten erfolgen. Hingegen bei neu geplanten Systemen kann oft nur durch das Gespräch mit Experten die Gültigkeit der entwickelten Modelle überprüft werden. Des Weiteren können bei der Validierung statistische Tests (wie beispielsweise die Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers) zur Modellüberprüfung herangezogen werden.<sup>154</sup>

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Verifizierung anhand des Vergleichs der Auswertungen der durchgeführten Testläufe des Simulationsmodells mit dem tatsächlichen Systemverhalten. Die Validierung wurde durch den Input-/Outputvergleich der Simulationsergebnisse mit realen Betriebsdaten sowie mittels Expertengesprächen realisiert. Zur Überprüfung der entwickelten Basisgleichung zur Beschreibung logistischer Kennlinien (siehe dazu Abschnitte 3.3.3.1.1 und 5.4.2) wurde die Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers vorgenommen.

---

<sup>154</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 137.

### 3 Wissenschaftstheoretische Grundlagen

Im dritten Kapitel erfolgt die Ausarbeitung der für diese Dissertation relevanten wissenschaftstheoretischen Grundlagen. Zu Beginn wird eine Einführung in die Produktionslogistik gegeben und die Grundlagen zur Systemtheorie und Kybernetik werden erläutert. Die darin beschriebenen Sachverhalte bilden einerseits die Basis zur Beschreibung von Produktionssystemen, andererseits werden diese auch zur Handhabung derer benötigt. Ebenso Inhalt dieses Kapitels sind die Ansätze zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung sowie der Kennlinientheorie. Einen weiteren Themenschwerpunkt von Kapitel 3 stellt die Modellierung logistischer Systeme dar. Zunächst wird jeweils eine allgemeine Einführung in die einzelnen Themengebiete gegeben, wobei im Anschluss daran die spezifische Aufarbeitung im Hinblick auf deren Einsatz in einer semikontinuierlichen Fertigung erfolgt.

#### 3.1 Hybride Produktionssysteme - Schnittstelle zwischen kontinuierlicher und diskreter Fertigung

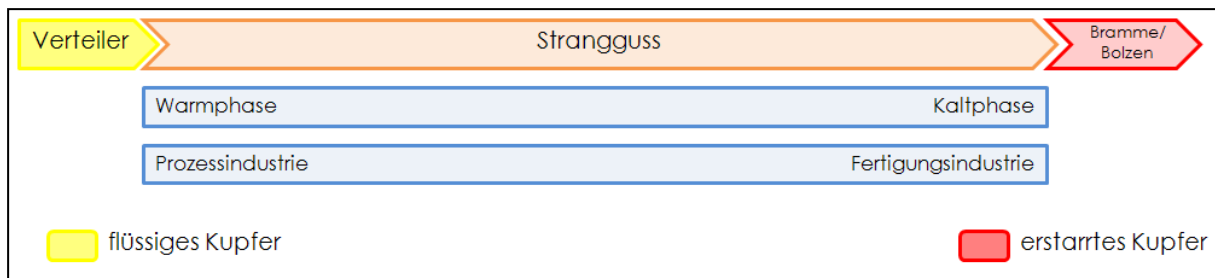
Da der Übergang zwischen der Prozess- und Fertigungsindustrie oftmals fließend ist, geht aus der Literatur keine einheitliche bzw. eindeutige Zuweisung einzelner Industrieunternehmen zu einem der beiden Industrietypen hervor.<sup>155</sup> Somit ist die Widerspruchsfreiheit und Eindeutigkeit in der Abgrenzung von der kontinuierlichen Fertigung (Prozess- bzw. Verfahrensindustrie) zur diskreten Fertigung (Fertigungs- bzw. Stückgutindustrie) nicht gegeben.

Diese Problematik wird in der vorliegenden Arbeit im Hinblick auf das dieser Arbeit zugrundeliegende Fallbeispiel einer Gießerei in einem Kupferhüttenwerk beschrieben. Dort treten sowohl kontinuierliche, als auch diskrete Fertigungsprozesse auf. Die Gießerei stellt somit den Übergang von der Prozess- auf die Fertigungsindustrie dar. Die Produktionsstruktur in der Gießerei (siehe dazu Abbildung 13) lässt sich in eine Warmphase und eine Kaltphase unterscheiden. Der genaue Zeitpunkt, ab welchem der Produktionscharakter von einem Stoffumwandlungsprozess zu einem Stoffumformungsprozess übergeht, ist nicht klar abgrenzbar.<sup>156</sup> Daher wird in der vorliegenden Arbeit nach der Definition von Deuse und Deckert der Übergang von der Warm- auf die Kaltphase und somit von einer kontinuierlichen auf eine diskontinuierliche Fertigung als Hybridfertigung bezeichnet. Am Beispiel der Gießerei der Kupferhütte geschieht im Zuge der Stranggussproduktion der Übergang von flüssigem auf erstarrtes Kupfer, womit an dieser Stelle von der Schnittstelle zwischen der Prozess- bzw. Verfahrensindustrie und der Fertigungsindustrie gesprochen werden kann.

---

<sup>155</sup> Vgl. Trautmann (2000), S. 5.

<sup>156</sup> Vgl. Deuse et al. (2006), S. 85.



**Abbildung 13: Produktionsstruktur einer Gießerei<sup>157</sup>**

Während die diskrete Fertigung auf den Wirkprinzipien der Stoffumformung beruht, handelt es sich bei einer kontinuierlichen Fertigung um eine Leistungserstellung auf den Prinzipien der Stoffumwandlung. Diese Untergliederung geht auf Riebel<sup>158</sup> zurück, welche die Produktionsprozesse nach der Wirkung der eingebrachten Inputfaktoren differenziert. Dabei unterscheidet dieser zwischen der Prozess- bzw. Verfahrensindustrie, welcher stoffumwandelnde Prozesse zugrunde liegen und der Fertigungsindustrie, welche durch stoffumformende Prozesse gekennzeichnet ist.

Bestimmend für eine kontinuierliche Fertigung ist die Veränderung der stofflichen Eigenschaften der eingebrachten Rohstoffe durch den Produktionsprozess.<sup>159</sup> Dabei lassen sich in der Regel in Industrieunternehmen der Prozess- bzw. Verfahrensindustrie zwei Arten von Stoffumwandlungsprozessen identifizieren:

*Chemische und biologische Stoffumwandlung:*

Alle Verfahren, welche auf den Gesetzmäßigkeiten der chemischen Reaktionstechnik basieren, wobei hier zwischen Verfahren zur Stoffzerlegung und zur Stoffverbindung unterschieden wird, zählen neben den immer mehr an Bedeutung gewinnenden biologischen Verfahren, welche die landwirtschaftlichen und biotechnischen Produktionsverfahren umfassen, zu den chemischen Verfahren.<sup>160</sup>

*Physikalische Stoffumwandlung:*

Hierbei erfolgt die Änderung physikalischer Stoffeigenschaften sowie die Trennung und Bildung von Stoffgemischen mit Hilfe physikalischer Vorgänge.<sup>161</sup> Physikalische Stoffumwandlungen, welche durch Änderungen der Temperatur oder des Druckes herbeigeführt werden, bezeichnet man als thermische Stoffumwandlung. Heiz- und Kühlprozesse sowie Entspannungs- und Verdichtungsprozesse sind durch Stoffumwandlungen ohne Änderungen der Zusammensetzung gekennzeichnet.<sup>162</sup>

<sup>157</sup> In Anlehnung an Deuse et al. (2006), S. 85.

<sup>158</sup> Vgl. Riebel (1967), S. 11 ff.

<sup>159</sup> Vgl. Fröhling (2006), S. 7.

<sup>160</sup> Vgl. Dyckhoff et al. (2005), S. 20 f.

<sup>161</sup> Vgl. Lucas (2007), S. 4.

<sup>162</sup> Vgl. Dyckhoff et al. (2005), S. 20 f.

Als typische Vertreter für die Prozess- bzw. Verfahrensindustrie sind die chemische Industrie, die erdölverarbeitende Industrie, die Nahrungsmittelindustrie, die pharmazeutische Industrie, Elektrizitätsbetriebe, die Hüttenindustrie und die Papierindustrie zu nennen.<sup>163</sup>

Zur Fertigungsindustrie zählen die Verfahren der Stoffumformung, welche die Formgebung der eingebrachten Stoffe zum Inhalt haben. Dabei kann zwischen Prozessen, welche ungeformte Güter mit festgelegten Geometrien versehen und Prozessen, welche das Zusammenfügen von Teilen und Baugruppen sowie Trenn-, Zerlege-, und Zerkleinerungsvorgänge beinhalten, unterschieden werden.<sup>164</sup> Die Fertigungsindustrie kennzeichnet sich durch diskrete Produktionseinheiten aus, während die Prozessindustrie meist kontinuierliche Prozesse aufweist.

„Der Grad der Kontinuität der Bearbeitung, der Handhabung und des Transportes des Aktionsobjektes“<sup>165</sup> differenziert die Fertigungsformen in diskrete und kontinuierliche. „Sind die Funktionselemente eines Materialflusses verkettet und im Sinne des Flussprinzips aufeinander abgestimmt, wird der Materialfluss als kontinuierlich bezeichnet“<sup>166</sup>, der sich typischerweise der Prozess- bzw. Verfahrensindustrie zuordnen lässt.

Die Prozessindustrie produziert daher meist Erzeugnisse in fixen Losgrößen bzw. kann aufgrund der Kontinuität der Fertigung, welche durch Prozessbedingungen, Aggregatsgrößen etc. gegeben ist und des fehlenden Vorhandenseins von Stückgütern, auch von einer Produktion mit Losgröße eins gesprochen werden. Die Produkte werden in festgelegten Einheiten wie Tonnen und Liter gemessen. Es wird nicht vom Stückgut wie in der diskreten Fertigung gesprochen.<sup>167</sup>

Dangelmeier definiert den Begriff des Stückgutes als „einzeln transportier- und erfassbare Güteinheiten. Diese können aus einem Einzelstück oder aus mehreren, zu einer Fördereinheit zusammengefassten Einzelteilen bestehen.“<sup>168</sup> „Als Stückgut werden [...] alle Gegenstände bezeichnet, die ohne Rücksicht auf Form und Gewicht während des Förderns als Einheit zu sehen sind.“<sup>169</sup> Dies ist bei einem Großteil der Güter der Prozessindustrie (wie z.B. Öl, Gas, Rohstahl, Kupfer) nicht gegeben.

Nichtdiskrete Einheiten werden ab einem bestimmten Punkt im Herstellungsprozess vereinzelt. Daher repräsentiert der betrachtete Zeitpunkt im Produktionsablauf ein wesentliches Merkmal zur Unterscheidung zwischen der Prozess- und Fertigungsindustrie.

Viele Industrien – so auch das Unternehmen im Fallbeispiel – stellen hybride Formen dar, d.h. diese weisen sowohl Charakteristika der kontinuierlichen als auch der diskreten Fertigung auf. Entscheidend ist dabei der Zeitpunkt der Betrachtung.<sup>170</sup> Man spricht daher oftmals in der

---

<sup>163</sup> Vgl. Loos (1997), S. 3.

<sup>164</sup> Vgl. Fröhling (2006), S. 8.

<sup>165</sup> Pawellek (2007), S. 83.

<sup>166</sup> Pawellek (2007), S. 83.

<sup>167</sup> Appoo (1987), S. 79 ff.

<sup>168</sup> Dangelmaier (2001), S. 672.

<sup>169</sup> Axmann (1993), S. 1.

<sup>170</sup> Vgl. Dennis et al. (2000b), S. 687.

Prozessindustrie von einer semikontinuierlichen Produktion, welche in dieser Arbeit als hybride Produktion bzw. Hybridfertigung bezeichnet wird. Dies tritt auf, wenn entweder der Materialzugang kontinuierlich und der Abgang diskret oder der Zugang diskret und der Abgang kontinuierlich erfolgen. Tatsache ist, dass aufgrund fehlender einheitlicher Definitionen und Abgrenzungen oftmals Schwierigkeiten betreffend der Anwendbarkeit von Instrumentarien, Werkzeugen und Methoden auftreten.<sup>171</sup>

## 3.2 Hybride Produktionssysteme

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst die Erläuterung der Grundlagen zu Produktionssystemen und eine kurze Einführung in die Systemtheorie, welche zum Abbilden und Verstehen der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge eines Produktionssystems notwendig ist, um darauf aufbauend, die Merkmale und Besonderheiten von Produktionssystemen beschreiben zu können. Einen weiteren Schwerpunkt dieses Unterkapitels bilden die Grundlagen der Kybernetik, welche bei der Umsetzung des entwickelten Vorgehenskonzeptes am Beispiel einer Gießerei (siehe dazu Kapitel 5) Anwendung finden.

### 3.2.1 Grundlagen der Produktionslogistik

Laut Ulrich<sup>172</sup> stellt ein Unternehmen ein offenes, zielorientiertes, produktives, soziales System, in welchem vielfältige Relationen zwischen den Elementen des Systems sowie zwischen dem System und seiner Umgebung (Umwelt) bestehen, dar. Wird ein Unternehmen als zielgerichtetes System betrachtet, so kann ein Produktionssystem als Subsystem mit der Aufgabe der Bereitstellung der richtigen Produkte in Art und Menge, in der richtigen Qualität, zum richtigen Zeitpunkt und zu den richtigen Kosten, wobei richtig von seitens des Kunden bestimmt wird, verstanden werden.<sup>173</sup> Somit bildet ein Produktionssystem nicht die Summe einzelner Teilfunktionen ab, sondern wird als System untereinander vernetzter Prozesse, welches sich wie ein Organismus verhält, beschrieben.<sup>174</sup> Dies impliziert, dass ein Produktionssystem (siehe dazu Abbildung 14), welches aus Input, Throughput (Produktionsprozess) und Output besteht, so ausgerichtet sein muss, dass die Erfolgsziele des Unternehmens damit realisiert werden können.

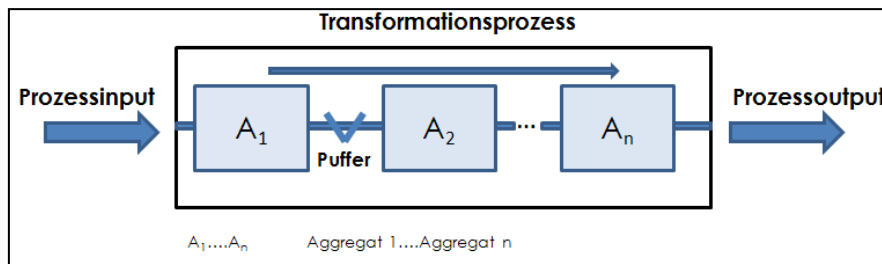
---

<sup>171</sup> Vgl. Günther (2004), S. 326.

<sup>172</sup> Vgl. Ulrich (1970), S. 153 ff.

<sup>173</sup> Vgl. Eversheim (1992), S. 10.

<sup>174</sup> Vgl. Malik (1996), S. 48.

Abbildung 14: Das Produktionssystem<sup>175</sup>

Den Input eines Produktionssystems bilden dabei die Produktionsfaktoren, welche in den Transformationsprozess eingehen und Erzeugnisse hervorbringen. Nach Gutenberg<sup>176</sup> können Produktionsfaktoren dabei in Elementarfaktoren und dispositive Faktoren unterschieden werden. Elementarfaktoren stellen dabei die menschliche Arbeitsleistung sowie die Betriebsmittel (Anlagen, Gebäude, Grundstücke etc.) und Werkstoffe (Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe) dar. Die Geschäfts- und Betriebsleitung, die Planung und die Betriebsorganisation (derivative Faktoren) werden dabei als dispositive Faktoren bezeichnet.

Die systemtheoretische Bezeichnung für die Leistung eines Produktionssystems wird dabei als Throughput oder Produktionsprozess angeführt. Hierbei erfolgt die Beschreibung des eigentlichen Produktionsvorgangs, welcher im Zuge der Leistungserstellung vollzogen wird und durch welchen die Veränderung der Produktionsfaktoren durch das Erfahren einer anderen qualitativen Beschaffenheit oder der Umwandlung in andere Erzeugnisse geschieht.<sup>177</sup> Der Produktionsprozess kann aus einer beliebigen Anzahl an verketteten Aggregaten bestehen, welche durch den Materialfluss miteinander verbunden sind. Durch den Einsatz von Puffern, welche zur Überbrückung von Unterbrechungen im Produktionsprozess oder zur Zwischenlagerung von Erzeugnissen dienen, erfolgt dabei die Entkoppelung der einzelnen Aggregate.

Nach den Anforderungen an den Produktionsprozess kann zwischen den folgenden Materialflussarten unterschieden werden:

Ein *linearer Materialfluss* herrscht vor, wenn jeder Produktionsschritt maximal einen Vorgänger besitzt.<sup>178</sup>

*Konvergierende Materialflüsse* sind dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Teile oder Baugruppen in ein Produkt einfließen, wie beispielsweise beim Schachtofenprozess in der Hüttenindustrie.<sup>179</sup>

Beim *divergierenden Materialfluss* besitzt ein Prozessschritt mehrere Nachfolger. In einer Raffinerie erfolgt so beispielsweise die Aufarbeitung des Rohöls in Diesel, Benzin etc.<sup>180</sup>

<sup>175</sup> In Anlehnung an Löschnauer et al. (2006), S. 95.

<sup>176</sup> Vgl. Gutenberg (1983), S. 11 ff.

<sup>177</sup> Vgl. Gutenberg (1983), S. 16 ff.

<sup>178</sup> Vgl. Günther et al. (2005), S. 19 f.

<sup>179</sup> Vgl. Günther et al. (2005), S. 19 f.

<sup>180</sup> Vgl. Günther et al. (2005), S. 19 f.

*Zyklische Materialflüsse* entstehen durch das mehrmalige Durchlaufen eines Produktes durch dasselbe Aggregat.<sup>181</sup>

Als Output des Produktionsprozesses werden jene Güter, welche den Produktionsprozess verlassen und zur Befriedigung der Kundenbedürfnisse dienen, verstanden. Dabei kann zwischen Endprodukten und Zwischenprodukten differenziert werden.<sup>182</sup> Als Endprodukte werden jene Güter bezeichnet, welche nach Verlassen des Produktionsprozesses auch das Unternehmen verlassen. Hingegen dienen Zwischenprodukte als Input für weitere Produktionssysteme in selbigem.

Nach Adam kann ein Transformationsprozess in vier Grundtypen der Produktion unterteilt werden:<sup>183</sup>

Die *durchgängige Produktion*, welche die einfachste Form der Materialumsetzung darstellt, ist dadurch gekennzeichnet, dass aus einem Input ein Output entsteht.

Werden mehrere Inputobjekte zu einem Outputobjekt zusammengefasst wie beispielsweise bei einem Montageprozess, dann spricht man von einer *synthetischen Produktion*.

Die *analytische Produktion* stellt den Gegensatz zur synthetischen Produktion dar. Dabei werden aus einem Inputobjekt mehrere Outputobjekte, wie beispielsweise bei einem Zuschneideprozess, hergestellt.

Die *analytisch-synthetische Produktion* ist gegeben, wenn aus mehreren Inputobjekten mehrere Outputobjekte entstehen. Beispielhaft dafür kann die Erzeugung von Schwarzkupfer im Schachtofen genannt werden, wo durch den Einsatz von metallhaltigen Schrotten und diversen Zusatzstoffen Schwarzkupfer, Schlacke u.a. entstehen.

Da zur Abbildung und Modellierung eines Produktionssystems und dessen Wechselbeziehungen ein klares Verständnis bezüglich der Ursache-Wirkungsbeziehungen des Systems, seiner Elemente und mit der Umgebung (Umwelt) herrschen muss, werden nachfolgend die Grundbegriffe der Systemtheorie erläutert.

### 3.2.2 Systemtheorie

Die Systemtheorie, welche entwickelt wurde, um Erkenntnisse unterschiedlicher Wissenschaften vergleichbar und übertragbar zu machen, liefert den theoretischen Hintergrund zur Beschreibung von Systemen.<sup>184</sup> Diese ermöglicht es komplexe Erscheinungen, die in Form eines Systems dargestellt werden können, besser zu verstehen und zu gestalten. Weiters beinhaltet die Systemtheorie Begriffe zur Beschreibung komplexer Gesamtheiten und Zusammenhänge,

---

<sup>181</sup> Vgl. Günther (2004), S. 326.

<sup>182</sup> Vgl. Gutenberg (1983), S. 19.

<sup>183</sup> Vgl. Adam (1997), S. 14 f.

<sup>184</sup> Vgl. Ulrich (2001), S. 42.

modellhafte Ansätze zur Veranschaulichung von realen Erscheinungen sowie Instrumente und Methoden, welche das gesamtheitliche Denken unterstützen.<sup>185</sup>

### 3.2.2.1 Grundlagen und Merkmale von Systemen

Unter einem System versteht man eine Menge von Elementen (im mathematischen Sinn), die in einer beliebigen Beziehung zueinander stehen und sich auf eine besondere Art und Weise von der Umwelt abgrenzen.<sup>186</sup>

In Abbildung 15 sind die Grundbegriffe der Systemtheorie grafisch dargestellt, auf welche im Anschluss im Detail eingegangen wird:

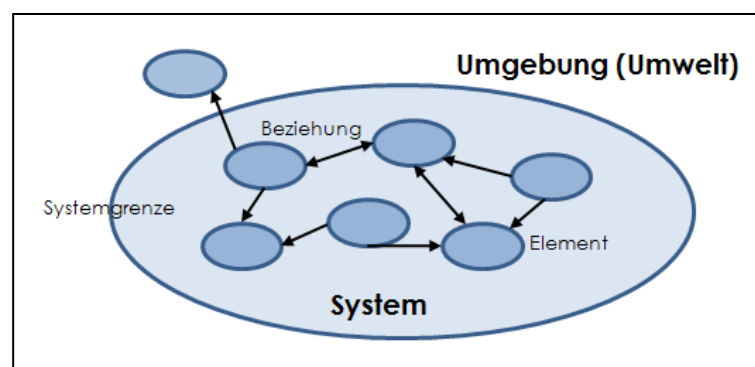


Abbildung 15: Grundbegriffe der Systemtheorie<sup>187</sup>

*Elemente und Beziehungen:*

Elemente eines Systems bezeichnen die einzelnen Systemkomponenten, wobei damit in einem sehr allgemeinen Sinn die Bausteine eines Systems gemeint sind.<sup>188</sup> Durch Beziehungen und Relationen hinsichtlich des Materialflusses und/oder des Informationsflusses oder Lagerbeziehungen sind diese Elemente miteinander verbunden. Diese Beziehungen können entweder einen linearen Verlauf aufweisen, was bedeutet, dass ein Element auf ein anderes ohne Rückwirkung Einfluss nimmt oder es besteht eine Wechselwirkung zwischen diesen Elementen.<sup>189</sup>

*Systemgrenze und Umgebung (Umwelt):*

Der Begriff Systemgrenze kennzeichnet die mehr oder weniger frei gewählte Abgrenzung des Systems von seiner Umgebung (Umwelt), wobei die Systemgrenzen meistens nach organisatorischen Gesichtspunkten gesetzt werden. Eine Systemgrenze bedeutet jedoch nicht, dass zwischen dem System und seiner Umgebung (Umwelt) keine Wechselwirkungen herrschen. Jedes System weist gegenüber seiner Umwelt Merkma-

<sup>185</sup> Vgl. Daenzer et al. (2002), S. 4.

<sup>186</sup> Vgl. Bertalanffy (1972), S. 18.

<sup>187</sup> In Anlehnung an Daenzer et al. (2002), S. 5.

<sup>188</sup> Vgl. Daenzer et al. (2002), S. 5.

<sup>189</sup> Vgl. Haberfellner (1975), S. 16.



le, Eigenschaften und Kennzahlen auf, welche als Attribute bezeichnet werden. Hervorzuheben ist, dass zwischen einem System und seiner Umgebung (Umwelt) meist schwächere Beziehungen bestehen als zwischen den Elementen innerhalb eines Systems.<sup>190</sup>

#### *Struktur:*

Durch die Tatsache, dass Elemente und Beziehungen ein Gefüge bilden, weisen diese eine Ordnung auf. Dabei spricht man von der Struktur eines Systems, in welcher Ordnungsprinzipien und Anordnungsmuster vorherrschen.<sup>191</sup>

#### *Offene und geschlossene Systeme:*

Je nach Festlegung der Systemgrenzen kann man zwischen offenen und geschlossenen Systemen unterscheiden. Offene Systeme sind durch eine Vielzahl an Verbindungen zwischen dem System und seiner Umgebung (Umwelt) gekennzeichnet. Geschlossene Systeme hingegen weisen keine Wechselwirkungen zwischen dem System und seiner Umgebung (Umwelt) auf.<sup>192</sup>

#### *Statische und dynamische Systeme:*

Je nachdem ob der Faktor Zeit als Systemkategorie relevant ist, kann die Einteilung in statische Systeme, bei welchen der Faktor Zeit unwesentlich ist, oder in dynamische Systeme, welche im Zeitablauf unterschiedliche Zustände durchlaufen, unterteilt werden.<sup>193</sup> Dynamische Systeme sind durch Transformationen im Rahmen derer ein Element eines Systems in ein anderes übergeht, gekennzeichnet.<sup>194</sup>

Wendet man die Systemtechnik auf ein Produktionsunternehmen an, bilden die Elemente die einzelnen Funktionen, die zur Erzeugung der Produkte erforderlich sind. Die Beziehungen zwischen diesen Elementen werden durch die Grundgrößen (Elementarfaktoren) Material, Energie und Information hergestellt. Energiebeziehungen können nur dann vernachlässigt werden, wenn keine technischen Prozesse untersucht werden.<sup>195</sup>

### 3.2.2.2 Systemtheoretische Betrachtungsweisen

Da systemtheoretische Betrachtungsweisen wesentliche Ansätze für die Entwicklung von Modellen, die zur Abbildung eines Systems und den darin herrschenden Zusammenhängen der Systemelemente herangezogen werden können, liefern, werden diese nun im Anschluss erläutert:

---

<sup>190</sup> Vgl. Daenzer et al. (2002), S. 6.

<sup>191</sup> Vgl. Daenzer et al. (2002), S. 6.

<sup>192</sup> Vgl. Hassenstein (1972), S. 37.

<sup>193</sup> Vgl. Hughes (1969), S. 8.

<sup>194</sup> Vgl. Wiener (1948), S. 63.

<sup>195</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. B 3-5.

*Die umfeldorientierte Betrachtungsweise:*

Die größte Art der Systemanalyse stellt die umfeldbezogene Betrachtungsweise dar. Dabei konzentriert man sich rein auf die Zusammenhänge und Verbindungen zwischen dem System und seiner Umgebung. Das System selbst wird dabei vernachlässigt und stellt eine sogenannte Black-Box dar.<sup>196</sup> Als Black-Box wird ein Objekt dann bezeichnet, wenn weder der Aufbau noch die innere Funktionsweise dessen relevant sind. Vielmehr geht es dabei um die Darstellung der Input-Output Verarbeitung und die Ermittlung der externen Faktoren, welche auf die Funktionsweise des Systems Einfluss nehmen.<sup>197</sup>

*Die wirkungsorientierte Betrachtungsweise:*

Bei dieser Betrachtung werden zum einen die Schnittstellen zwischen dem System und seiner Umgebung (Umwelt) berücksichtigt, andererseits findet auch die Abstrahierung von der inneren Struktur des Systems statt. Die eigentlichen strukturellen Wechselbeziehungen innerhalb des Systems interessieren dabei nicht. Vielmehr stehen die Fragen „Welche Inputs benötigt das System?“ und „Was produziert das System bei gegebenem Input als Output?“ im Mittelpunkt, wobei der Input die Verbindungen, welche auf das System ausgerichtet sind, bezeichnet, und als Output all jene Verbindungen bezeichnet werden, welche das System verlassen.<sup>198</sup> Diese Betrachtungsweise findet meist im Rahmen der Grobcharakterisierung von Problemfeldern und Lösungen Anwendung, da durch diese sowohl die Erkennung möglicher Problemstellungen als auch die Ermittlung der durch die Inputfaktoren beeinflussbaren Auswirkungen auf das Ergebnis erreicht werden können.<sup>199</sup>

*Die strukturorientierte Betrachtungsweise:*

Bei der strukturorientierten Betrachtungsweise steht die Ermittlung wie das Ergebnis bzw. der Output zustande kommt im Mittelpunkt. Um erklären zu können, wie die Transformation des Inputs in den Output geschieht, erfolgt die sukzessive Auflösung der Black-Box. Dabei werden die Fragen nach der Entstehung des Outputs und nach der Art der Beziehungen zwischen den Elementen eines Systems beantwortet (siehe dazu Abbildung 16). Um dies zu erreichen bedarf es der Darstellung und Definition der systeminternen Elemente und Beziehungen.<sup>200</sup>

---

<sup>196</sup> Vgl. Daenzer et al. (2002), S. 10.

<sup>197</sup> Vgl. Goldstein (1999), S. 23 f.

<sup>198</sup> Vgl. Ropohl (1975), S. 26.

<sup>199</sup> Vgl. Daenzer et al. (2002), S. 12.

<sup>200</sup> Vgl. Daenzer et al. (2002), S. 12 f.

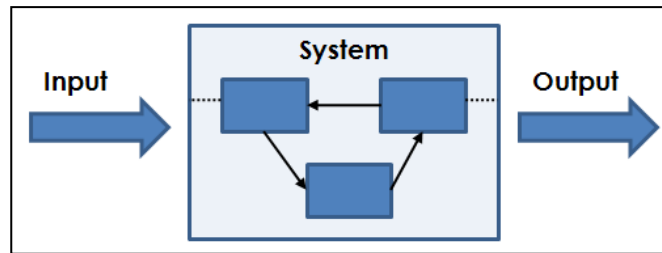


Abbildung 16: Strukturorientierte Betrachtungsweise<sup>201</sup>

Damit ein wie oben beschriebenes Produktionssystem unter Kontrolle gehalten werden kann, müssen die Grundprinzipien der Kybernetik, deren Beschreibung anschließend erfolgt, beherrscht und angewandt werden.

### 3.2.3 Kybernetische Grundprinzipien

Die Kybernetik ist die Wissenschaft der Steuerungskunst (technischer) Systeme und wurde im Wesentlichen vom Amerikaner Norbert Wiener in den 1950er geprägt. Das Ziel der Fertigungssteuerung ist das effiziente Durchführen produktionsrelevanter Entscheidungen. Aktionen sollen möglichst fertigungsnahe und rasch vollzogen werden, jedoch ebenfalls auf das Gesamtziel (nicht bereichsorientiert) ausgerichtet sein. Diese Theorie der Steuerung beziehungsweise Regelung hat die Kybernetik zum Inhalt. Bei der Kybernetik handelt es sich somit um die Kontrolle und Abweichungsanalyse von Systemen.<sup>202</sup>

Da der Abstraktionsgrad in der Begriffsbildung der Kybernetik sehr hoch ist, kann dieser von verschiedensten Fachbereichen genutzt werden. Überall dort, wo ein stabiler Zustand erwünscht und durch dynamische Rückkoppelung erhalten werden soll, findet die Kybernetik Verwendung.<sup>203</sup>

Im Unterschied zur Systemtheorie sind kybernetische Systemmodelle nicht rein theoretischer Natur, da diese auf die Realität übertragbar sein müssen.<sup>204</sup> Georg Klaus definiert die Kybernetik als „[...] die allgemeine, formale Wissenschaft von der Struktur, den Relationen und dem Verhalten dynamischer Systeme.“<sup>205</sup>

#### 3.2.3.1 Anwendung kybernetischer Grundprinzipien in Produktionssystemen

Da es in einer Produktion eine Vielzahl von Einzelkomponenten gibt, welche alle durch Wechselwirkungen miteinander verknüpft sind und ein nichtdeterministisches Systemverhalten vorherrscht, beschreibt Pallewek<sup>206</sup> den Zusammenhang zwischen den Produktionsprozessen und

<sup>201</sup> In Anlehnung an Goldstein (1999), S. 23 f.

<sup>202</sup> Vgl. Flechtner (1970), S. 8.

<sup>203</sup> Vgl. Klaus et al. (1976), S. 324.

<sup>204</sup> Vgl. Flechtner (1970), S. 229.

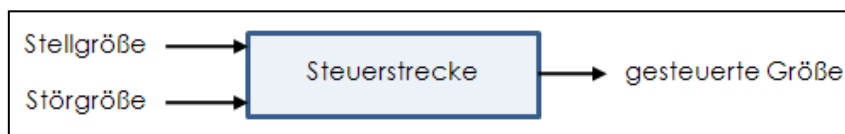
<sup>205</sup> Flechtner (1970), S. 10.

<sup>206</sup> Vgl. Pawellek (2007), S. 24.

der Systemtheorie bzw. der Kybernetik als Vergleich der Fertigung mit einem offenen dynamischen System.

Bevor nun auf die Relevanz der Kybernetik bei der Anwendung in Produktionssystemen eingegangen wird, erfolgt eine kurze Erläuterung der kybernetischen Grundprinzipien Regelung und Steuerung:

Die Steuerung ist laut DIN 19226 definiert als ein Vorgang „bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen auf Grund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen (siehe dazu Abbildung 17).“<sup>207</sup> Die Steuerung ist darauf ausgelegt, Prozesse auf vorgegebene Ziele mittels Anweisungen auszurichten, wodurch dem System ein Verhalten und kein Ziel vorgegeben wird.<sup>208</sup> Es wird versucht durch gezielte Steuerung einen Zustand A in einen, mit bestimmten Methoden herbeigeführten, gewünschten Zustand B zu überführen. Um nun vom Zustand A zum Zustand B zu gelangen, ist ein bestimmter Weg zu finden. Ein solcher Wirkungsweg wird auch als Steuerkette bezeichnet. Jede Steuerkette enthält für jede gesteuerte Größe (des betrachteten Systems) eine Steuerstrecke und eine Steuereinrichtung. Die Eingangsgrößen werden als Stellgrößen oder Störgrößen bezeichnet und das Ausgangssignal wird gesteuerte Größe genannt. Die Einflussnahme durch die Steuerung geschieht von „außen“, d.h. diese wird außerhalb der Systemgrenzen durchgeführt. Somit kann das Eingreifen in den normalen Ablauf des Systems auch als Störung durch den Steuerer bezeichnet werden.<sup>209</sup>



**Abbildung 17: Wirkungsprinzip einer Steuerung**<sup>210</sup>

Da die Steuerung vorwärtsgerichtet wirkt, kann nicht auf unvorhergesehene Störungen reagiert werden.<sup>211</sup> Im Gegensatz dazu beruht die Regelung auf der Einführung eines Rückkopplungsprozesses und stellt eine besondere Form des Steuerns dar, da es sich hierbei um eine „Selbststeuerung des Systems“ handelt.<sup>212</sup>

Die Regelung (siehe dazu Abbildung 18) ist definiert als ein Vorgang, bei dem „die zu regelnde Größe fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen, und abhängig vom Ergebnis dieses Vergleichs im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.“<sup>213</sup> Bei der Regelung wird, wie auch bei der Steuerung, ein Ziel von außen gesetzt. Doch das Verhalten wird zum Unterschied zur Steuerung nicht von außen gesteuert, sondern das System ist so geschaltet, dass es sich selbst steuert.<sup>214</sup> Die Regelung erfolgt über

<sup>207</sup> DIN 19226.

<sup>208</sup> Vgl. Ulrich (1970), S. 120.

<sup>209</sup> Vgl. Flechtner (1970), S. 35.

<sup>210</sup> In Anlehnung an Flechtner (1970), S. 651.

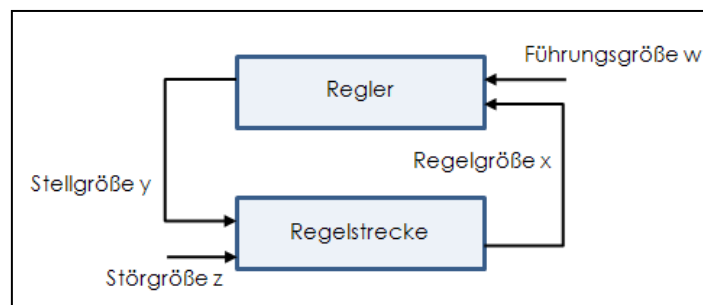
<sup>211</sup> Vgl. Westphal (2001), S. 71 f.

<sup>212</sup> Vgl. Flechtner (1970), S. 34.

<sup>213</sup> DIN 19226.

<sup>214</sup> Vgl. Flechtner (1970), S. 34.

eine Regelkreisstruktur, welche wie bereits erwähnt eine Rückkoppelung bewirkt. Diese Rückkoppelung ist eine spezielle Art der Wechselwirkung, welche darauf beruht, dass sich zwei oder mehrere (System)Elemente in einer geschlossenen Kausalkette gegenseitig beeinflussen. Der Regelkreis besteht aus einer Regelstrecke und einer Regeleinrichtung (Regeleinheit oder Regler). Dabei ist es die Aufgabe des Reglers, die veränderliche Regelgröße  $x$  mit der Führungsgröße  $w$  zu vergleichen und bei einer festgestellten Abweichung mittels der Stellgröße  $y$  auf die Regelstrecke einzuwirken. Ziel ist es dabei, die Differenz zwischen der Regelgröße  $x$  und der Führungsgröße  $w$  so gering als möglich werden zu lassen und somit die Auswirkung der Störgröße  $z$  auf die Regelstrecke auszugleichen.<sup>215</sup>



**Abbildung 18: Funktionsschema des Regelkreises<sup>216</sup>**

Der Vorteil von Regelkreisen gegenüber Steuerketten liegt darin, dass eine Systemstabilisierung auch dann erreicht werden kann, wenn mehrere Störgrößen einwirken oder der Einfluss der Störungen auf die gesteuerten Größen im Vorhinein nicht bekannt ist.<sup>217</sup>

Bei der prozessorientierten Definition eines offenen Regelkreises nimmt der Mensch als Regler eine zentrale Rolle ein, indem dieser basierend auf einer vorliegenden Zielabweichung im Rahmen eines Problemlösungsprozesses Maßnahmen zur Prozessstabilisierung festlegt.<sup>218</sup> Auch hier besteht ein Regelkreis aus einer Regelstrecke (dem Prozess) und dem Regler (dem Controller). Der Controller überwacht dabei ständig bzw. in festgelegten Zeitintervallen die Differenz zwischen dem vorgegeben Plan- bzw. Soll- und dem Ist-Wert. Treten dabei Abweichungen zwischen Soll und Ist auf, da eine Störgröße auf die Regelstrecke einwirkt und dementsprechende Abweichungen verursacht, muss der Regler (der Controller) eingreifen, um dementsprechende Maßnahmen einzuleiten, damit die Abweichungen ausgeglichen werden können. Ulrich<sup>219</sup> bezeichnet diesen Prozess des Festlegens, des Auslösens und des Kontrollierens von zielgerichteten Aktivitäten als „Lenkung“. Allgemein bedeutet Lenkung daher einen Prozess unter Kontrolle zu halten. Ziel der Produktionslenkung ist es, die Prozesse der Produktionsbereiche eines Systems aufeinander abzustimmen und die einzelnen Produktionsstufen im Sinne eines kontinuierlichen Flusses zeit- und mengenmäßig zu synchronisieren.<sup>220</sup>

<sup>215</sup> Vgl. Flechtner (1970), S. 42 und Klaus et al. (1976), S. 651.

<sup>216</sup> In Anlehnung an Flechtner (1970), S. 651.

<sup>217</sup> Vgl. Lerner (1970), S. 99.

<sup>218</sup> Vgl. Westpahl (2001), S. 72 f.

<sup>219</sup> Vgl. Ulrich (1984), S. 99 f.

<sup>220</sup> Vgl. Westpahl (2001), S. 201 f.

Es ist zu erkennen, dass es durchaus Gemeinsamkeiten zwischen den Grundsätzen der Kybernetik und der Produktion eines Unternehmens gibt. Die Bedeutung der Kybernetik für die Anwendung in Produktionssystemen besteht vor allem darin, dass sich diese mit Problemstellungen beschäftigt, wie Systeme daran gehindert werden können unkontrolliert und unkoordiniert zu agieren.<sup>221</sup>

Durch Anwendung der Grundlagen zur Systemtheorie und Kybernetik ist es möglich ein Produktionssystem und dessen Verhalten zu beschreiben, um gezielt darauf Einfluss nehmen zu können. Da in der vorliegenden Arbeit dies am Beispiel einer Gießerei angewendet wird, in welcher sowohl kontinuierliche als auch diskrete Fertigungsprozesse auftreten, erfolgt nun die Fokussierung der systemtheoretischen Betrachtungen auf ein Produktionssystem mit Hybridfertigung.

### 3.2.4 Charakterisierung von Produktionssystemen mit Hybridfertigung

Produktionssysteme, in welchen eine Hybridfertigung auftritt, unterscheiden sich zu anderen (mehrstufigen) Verfahren der Fertigung vor allem in der Kontinuität der Fertigung (siehe dazu Abschnitt 3.1). Da hierbei der Übergang von einer kontinuierlichen Fertigung auf eine diskrete Produktion erfolgt, beinhaltet ein hybrides Produktionssystem stets eine Schnittstelle im Material- als auch im Informationsfluss.

Somit stellt die Beschreibung und Charakterisierung eines Produktionssystems in der Hybridfertigung eine besondere Herausforderung dar. Zur ganzheitlichen Beschreibung dessen muss stets eine getrennte Betrachtung des Systemverhaltens vor und nach dem Übergang von der kontinuierlichen auf die diskrete Fertigung erfolgen.

In Anlehnung an Feiner lassen sich hybride Produktionssysteme, in welcher eine hybride Form der Fertigung in Erscheinung tritt, als Systeme definieren, in welchen eine Kombination von Produktionstechnologien basierend auf unterschiedlichen physikalischen oder chemischen Prinzipien oder durch die Integration separater Produktionsprozesse in einem einzigen Produktionsprozess auftritt.<sup>222</sup> Eine Gießerei, welche sowohl eine Schachtofenanlage als auch eine nachfolgende Stranggussanlage umfasst – in Anlehnung an das Fallbeispiel dieser Arbeit – stellt nach dieser Definition ein hybrides Produktionssystem dar. Den Vorteil von hybriden Systemen der Fertigung sieht Feiner<sup>223</sup> in der Möglichkeit mehrere Produktionsschritte durch einen hybriden Prozess zu ersetzen und durch die Integration unterschiedlicher Produktionstechnologien eine Verkürzung des Materialflusses und eine Fokussierung im Planungsaufwand zu erzielen. Zudem ermöglichen hybride Prozesse die Bearbeitung neuer Materialien, welche mit anderen Verfahren in keinem wirtschaftlichen Maße bearbeitet werden können.<sup>224</sup>

<sup>221</sup> Vgl. Zielowski (2005), S. 30.

<sup>222</sup> Vgl. Feiner et al. (2005) in Brecher et al. (2011), S. 33.

<sup>223</sup> Vgl. Feiner et al. (2005) in Brecher et al. (2011), S. 33 f.

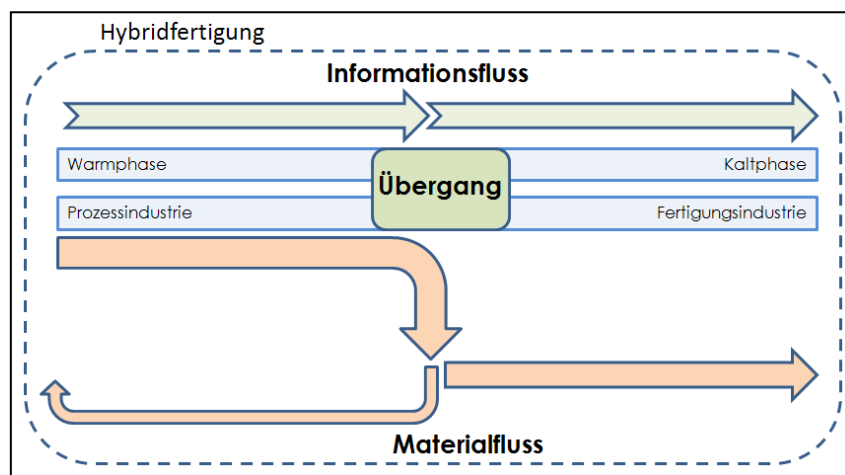
<sup>224</sup> Vgl. Klocke et al. (2007) in Brecher et al. (2011), S. 33.

Zur Charakterisierung eines Produktionssystems der Hybridfertigung erfolgt nun die Identifizierung der systembestimmenden Merkmale – Material- und Informationsfluss, Lagerung, Prozessausführung, Prozesssteuerung, Klassifikation der Produktionsanlagen und substitutionale Faktorbeziehungen.<sup>225</sup>

### **Material- und Informationsfluss:**

Produktionssysteme mit Hybridfertigung weisen verfahrensbedingte Merkmale, welche durch chemische, physikalische und biologische Prozesse gegeben sind, auf.<sup>226</sup> Entsprechend kann hier zwischen einem linearen, konvergierenden, divergierenden oder linearen Materialfluss unterschieden werden, wobei in vielen Fällen auch eine Mischform dieser Strukturen gegeben ist.<sup>227</sup> Abgrenzend zur Prozess- bzw. Verfahrensindustrie ist die Hybridfertigung durch den Wechsel von einer zyklischen Produktion, bei der ein Nebenprodukt meist wieder in den Herstellungsprozess eines Vorproduktes einfließt, auf einen linearen Materialfluss gekennzeichnet.<sup>228</sup> Die Produkte des linearen Materialflusses, welcher die anschließende diskrete Fertigung abgrenzt, fließen großteils nicht mehr in den Herstellungsprozess von Vorprodukten ein.

Somit lassen sich hybride Fertigungsprozesse durch eine Unterbrechung und/oder einen Wechsel des Materialflusses kennzeichnen (siehe dazu schematische Darstellung in Abbildung 19). Dabei erfolgt die Diskretisierung (Vereinzelung) nichtdiskreter Einheiten im Herstellungsprozess.<sup>229</sup>



**Abbildung 19: schematische Darstellung der Schnittstelle Hybridfertigung<sup>230</sup>**

Im Informationsfluss kann simultan zum Materialfluss eine Unterbrechung festgestellt werden. Dies beruht ebenso auf dem Wechsel von einer kontinuierlichen auf eine diskrete Fertigung und den damit verbundenen Änderungen in der Produktionsplanung und den dabei zugrundeliegenden Systemen zur Produktionsplanung, -steuerung und -überwachung.

<sup>225</sup> Vgl. Dietrich (2007), S. 30 ff.

<sup>226</sup> Vgl. Schemme (2006), S. 79.

<sup>227</sup> Vgl. Loos (1997), S. 39.

<sup>228</sup> Vgl. Schoner (2008), S. 18 f.

<sup>229</sup> Vgl. Krenn (2008), S. 9.

<sup>230</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

**Lagerung:**

Kennzeichnend für Produktionssysteme der Hybridfertigung sind einerseits Produkte, welche in der Regel große Gewichte und Volumina aufweisen bzw. hat die Lagerung dieser nach bestimmten Vorschriften zu erfolgen wie beispielsweise die Lagerung von explosionsgefährdenden Stoffen. Dazu werden in vielen Fällen spezielle (meist platzintensive) Lagervorrichtungen benötigt (z.B. Tanks oder Silos), wodurch Lagerflächenengpässe entstehen.<sup>231</sup> Gleichzeitig erfolgt in der Hybridfertigung aber auch die Lagerung von Stückguten. Ein Stückgut, welches als „einzeln erfass- und transportierbare Guteinheit“ definiert ist, welches „[...] aus einem Einzelstück oder aus mehreren, zu einer Fördereinheit zusammengefassten Einzelteilen besteht“<sup>232</sup>, muss meist getrennt bzw. hat die Lagerung anders zu erfolgen als die Lagerung nichtdiskreter Einheiten. Es ist dabei irrelevant, ob es sich um Einzelteile handelt oder dabei „all jene Gegenstände betrachtet werden, die ohne Rücksicht auf Form und Gewicht während des Förderns als Einheit zu sehen sind.“<sup>233</sup> Dies wiederum hat zur Folge, dass sich die Problematik betreffend von (nicht genügend) vorhandenen Lagerkapazitäten verschärft. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in der Hybridfertigung stets getrennte Lagerplätze für diskrete (Stückgut) und nichtdiskrete Einheiten (Schüttgut) zu finden sind. Dies wiederum impliziert, wie bereits angeführt, das vermehrte Auftreten von Kapazitätsengpässen in der Lagerhaltung.

**Prozessausführung:**

Betreffend die Prozessausführung kann die Aussage getroffen werden, dass hierbei stets der Übergang von einer kontinuierlichen auf eine diskontinuierliche Produktion erfolgt. Meist hat der Ablauf des Produktionsprozesses aus technologischen oder verfahrensbedingten Gründen stetig zu erfolgen, wobei hier von einer kontinuierlichen Produktion gesprochen wird.<sup>234</sup> Dabei durchlaufen die Materialien alle Fertigungsstufen in einem stetigen Fluss. Um dies gewährleisten zu können, bedarf es des Einsatzes von Puffern, damit der kontinuierliche Charakter durch einen reibungslosen Produktionsablauf und Transport sichergestellt werden kann.<sup>235</sup> Ebenso weisen diese Anlagen einen hohen Automatisierungsgrad auf.<sup>236</sup> Im Anschluss daran erfolgt die diskontinuierliche Fertigung, welche oftmals als Chargenproduktion bezeichnet wird. Dabei werden einzelne Produktionsschritte zeitentkoppelt durchgeführt, wobei die Gesamtheit der im Zuge eines Produktionsschrittes hergestellten Menge als Charge bezeichnet wird. Die Menge an gefertigten Teilen (Charge oder Los) wird an einer Fertigungsstufe gesammelt, bevor diese an die nächste Bearbeitungsstufe weitergegeben wird. Dabei können auch einzelne Produktionsschritte innerhalb einer Chargenproduktion kontinuierlich durchge-

---

<sup>231</sup> Vgl. Schoner (2008), S. 23.

<sup>232</sup> Vgl. Dangelmaier (2001), S. 672.

<sup>233</sup> Vgl. Axmann (1993), S. 1.

<sup>234</sup> Vgl. Loos (1997), S. 46.

<sup>235</sup> Vgl. Neuhaus (2008), S. 12.

<sup>236</sup> Vgl. Spengler et al. (2008), S. 147.



führt werden.<sup>237</sup> Die Größe der Charge ist dabei meist durch Mindestbestimmungen oder das Fassungsvermögen der Aggregate bestimmt. In der Produktionsprogrammplanung erfolgt zumeist eine Bündelung einzelner Kundenaufträge in Chargen, um Rüstvorgänge beispielsweise an der Stranggussanlage, Reinigungsvorgänge sowie An- und Abfahrvorgänge zu reduzieren und somit Zeit- und vor allem Kosteneinsparungen erzielen zu können.<sup>238</sup> Beachtung hat die Tatsache zu finden, dass aufgrund herstellungsspezifischer Restriktionen eine beliebige Chargenreihenfolge nicht immer realisiert werden kann.<sup>239</sup>

### **Prozessstreuung:**

Produktionssysteme der Hybridfertigung unterliegen meist einer sehr großen Prozessstreuung. Die Prozessstreuung stellt dabei ein Maß zur Beschreibung der Bandbreite der eingetretenen Ergebnisse bzw. angenommenen Zustände oder Werte von Prozessen dar.<sup>240</sup> Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Dauer der einzelnen Prozessschritte der kontinuierlichen Fertigung von jenen der diskreten Fertigung maßgeblich unterscheiden. Generell kann die Aussage getroffen werden, dass die Dauer der kontinuierlichen Prozesse je nach herzustellendem Erzeugnis variieren, während die Prozesse der diskreten Fertigung geringere Streuungen aufweisen. So kann beispielsweise die Herstellungsdauer von Kupfer je nach der Zusammensetzung/Befüllung der Schachtofenanlage variieren, während die Weiterverarbeitungsschritte (z.B. walzen, pressen, tiefziehen) in der Regel einer konstanten Prozessdauer unterliegen. Um die Streuung des Herstellungsprozesses überbrücken bzw. reduzieren zu können, behilft man sich in der betrieblichen Praxis durch das Schalten von „Zwischenaggregaten“. Diese (z.B. Warmhalteöfen, die zwischen einem Schachtofen und einer Stranggussanlage „zwischen geschaltet“ werden) dienen zum Ausgleich der Streuung der unterschiedlichen Fertigungszeiten.<sup>241</sup>

### **Klassifikation der Produktionsanlagen:**

Die Klassifikation von Produktionsanlagen kann in Einzweckanlagen und Mehrproduktanlagen erfolgen. Einzweckanlagen sind durch die Herstellung von Chargen desselben Produkts gekennzeichnet. Ausgelegt auf die Massenproduktion, lassen Einzweckanlagen nur eine Variation der Steuerungsparameter in den einzelnen Verfahrensschritten zu.<sup>242</sup> Die Umstellung der Anlage auf ein anderes Erzeugnis ist daher – wenn überhaupt – nur mit einem dementsprechenden großen Aufwand möglich.<sup>243</sup> Mehrproduktanlagen sind durch die Herstellung verschiedener, aber meist ähnlicher Produkte, welche nach weitgehend gleichen Verfahren nacheinander hergestellt werden, gekennzeichnet.<sup>244</sup> Daher ist die Anpassung hinsichtlich

---

<sup>237</sup> Vgl. Schoner (2008), S. 20.

<sup>238</sup> Vgl. Schönsleben (2007), S. 419.

<sup>239</sup> Vgl. Dorn (1996), S. 393.

<sup>240</sup> Vgl. Quentin (2008), S. 74.

<sup>241</sup> Vgl. Kupferhütte (2011b), S. 20.

<sup>242</sup> Vgl. Schoner (2008), S. 25.

<sup>243</sup> Vgl. Neuhaus (2008), S. 15.

<sup>244</sup> Vgl. Yang (2005), S. 22.

des Herstellungsverfahrens, des Produktionssortiments sowie der Ausbringungsmenge flexibel und mit einem geringeren Aufwand verbunden. Da meist sehr ähnliche Produktvarianten erzeugt werden, treten bei diesen Anlagen meist keine reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten auf. Mittels Mehrzweckanlagen können aber auch Produkte, welche unterschiedlichste Eigenschaften aufweisen, hergestellt werden.<sup>245</sup> Die dadurch entstehende Heterogenität des Produktspektrums bedingt oftmals reihenfolgeabhängige Rüstzeiten. Zwar bieten Mehrzweckanlagen ein hohes Maß an Flexibilität, was jedoch in einem höheren Steuerungsaufwand, welcher wiederum meist mit einem höheren Automatisierungsgrad verbunden ist und in höheren Anlageleerzeiten resultiert.<sup>246</sup> Da die Anlagen, welche in der Hybridfertigung zum Einsatz kommen, eine hohe Kostenintensität besitzen, kommt der Anlagenauslastung meist oberste Priorität zu. In der Regel existieren oft nur einzelne Anlagen, egal ob es sich dabei um eine Einzweck-, Mehrprodukt- oder Mehrzweckanlage handelt, weshalb ein Ausfall derer einen Stillstand im gesamten Produktionsprozess bedingt.<sup>247</sup> Aufgrund der Tatsache, dass die Versorgungssicherheit der Produktion und das damit verbundene Sicherheitsdenken an erster Stelle stehen<sup>248</sup>, ist die Hybridfertigung, ebenso wie die Prozessindustrie, durch einen hohen Bestand an Rohmaterialien gekennzeichnet.<sup>249</sup> Durch das notwendige Zwischenschalten von Puffern, welche zur Überbrückung des Fertigungswechsels dienen, findet man in hybriden Produktionssystemen meist auch einen hohen Bestand an Halbfabrikaten.

### **Substitutionale Faktorbeziehungen:**

Substitutionale Faktorbeziehungen sind dann gegeben, wenn Faktoreinsatzmengen bis zu einem bestimmten Grad ausgetauscht werden können, ohne dass sich dabei der Output verändert und dass geringe Mengen eines Faktors durch den Einsatz einer anderen, höheren Faktormenge substituiert werden können. Dabei stehen die Faktoreinsatzmengen in keinem festen Verhältnis zueinander, ebenso wenig wie zum Ertrag.<sup>250</sup> Die teilweise realisierbare Substitutionalität einzelner Einsatzfaktoren in der Hybridfertigung beeinflusst dabei maßgeblich den weiteren Produktionsverlauf. So können kleine Abweichungen zu erheblichen Veränderungen im Produktionsablauf (vor allem in der Herstelldauer) und damit auch im Materialfluss führen.<sup>251</sup>

Den Abschluss des Abschnittes 3.2.4 bildet die eigene Darstellung eines Produktionssystems der Hybridfertigung auf Basis der erörterten Charakteristika.

Den Input eines Produktionssystems der Hybridfertigung können sowohl Einzweckanlagen (z.B. Schachtofenanlage) und als auch mehrere parallel geschaltete Aggregate darstellen (bei-

---

<sup>245</sup> Vgl. Neuhaus (2005), S. 15.

<sup>246</sup> Vgl. Schoner (2008), S. 26.

<sup>247</sup> Vgl. Günther (2004), S. 327.

<sup>248</sup> Vgl. Keck (1994), S. 33.

<sup>249</sup> Vgl. Krenn (2008), S. 35.

<sup>250</sup> Vgl. Vossebein (1997), S. 94 f.

<sup>251</sup> Vgl. Krenn (2008), S. 92.

spielsweise Rinneinduktionsöfen). Demnach liegt entweder eine synthetische, eine analytische oder eine analytisch-synthetische Produktion vor.

Die Gießerei eines Kupferhüttenwerkes kann sowohl als synthetische, analytische als auch als analytisch-synthetische Produktion betrachtet werden, da während des Fertigungsprozesses sowohl ein einzelner Strang hergestellt als auch aus einem Strang mehrere Rundbolzen unterschiedlicher Dimension entstehen können. Dabei treten auch substitutionale Faktorbeziehungen auf.

Je nachdem welche Produkte zu fertigen sind, kann der eigentliche Transformationsprozess einer Hybridfertigung sowohl zyklische, konvergierende, divergierende als auch lineare Materialflüsse enthalten.

Der Output eines hybriden Produktionssystems ist durch eine hohe Produktvielfalt aufgrund verschiedener physikalischer und chemischer Zusammensetzungen und unterschiedlichster Formate gekennzeichnet.

In Abbildung 20 erfolgt die graphische Veranschaulichung eines Produktionssystems der Hybridfertigung:

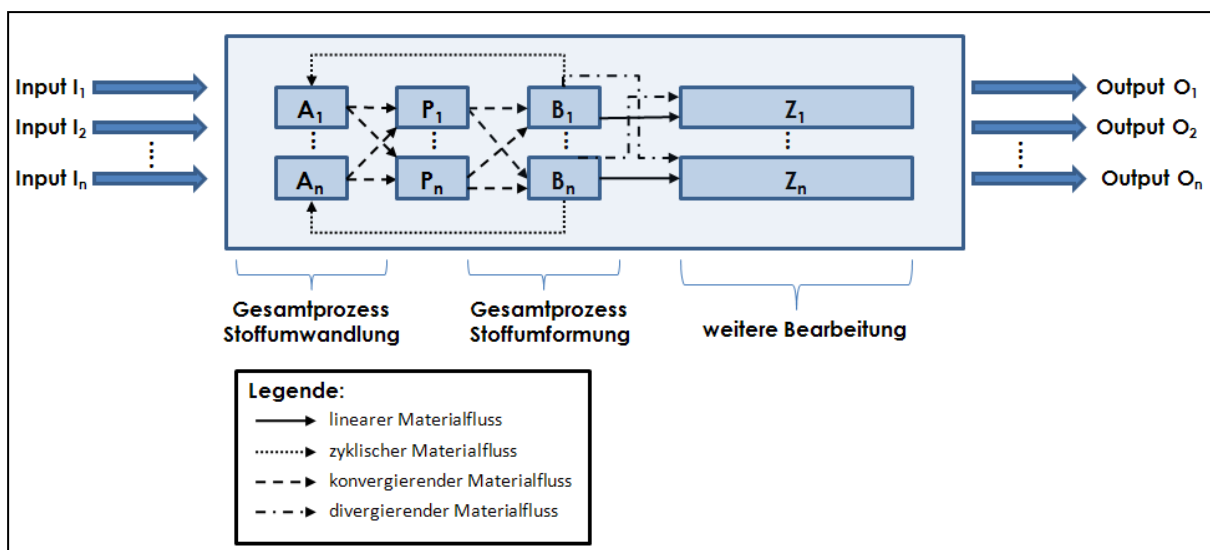


Abbildung 20: Produktionssystem mit Hybridfertigung<sup>252</sup>

Dieses beinhaltet meist  $A_1$  bis  $A_n$  Aggregate, welche für verfahrenstechnische Vorgänge zur Verfügung stehen und den Gesamtprozess der Stoffumwandlung repräsentieren. Im Anschluss sind  $P_1$  bis  $P_n$  Puffer zwischengeschaltet um den Übergang von der kontinuierlichen auf die diskrete Fertigung zu überbrücken. Daran angrenzen  $B_1$  bis  $B_n$  Aggregate, welche zur Durchführung der stoffumformenden Prozesse notwendig sind. Den Abschluss bilden meist Aggregate ( $Z_1$  bis  $Z_n$ ) zur Weiterverarbeitung der Aufträge (z.B. Zuschneideanlage).

<sup>252</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Aufbauend auf die Beschreibung des Produktionssystems erfolgt nun eine Erläuterung der Herausforderungen, welche sich im Speziellen für Produktionssysteme mit Hybridfertigung ergeben.

### 3.2.5 Herausforderungen an Produktionssysteme mit Hybridfertigung

Im Wesentlichen lassen sich die Herausforderungen an hybride Produktionssysteme, welche aus der Literatur abgeleitet und durch Befragungen von Experten in der betrieblichen Praxis ermittelt wurden anhand der äußerst komplexen Produktionsplanung und -steuerung, bedingt durch den Übergang von einer kontinuierlichen auf die diskrete Fertigung und den damit verbundenen Schwierigkeiten, zusammenfassen.

Die *Produktionsplanung* hat die planende Kombination der Elementarfaktoren menschliche Arbeitsleistung, Betriebsmittel und Werkstoffe zur Leistungserstellung zum Inhalt. Dies hat unter Berücksichtigung von Vorgaben und Restriktionen bezüglich des Produktionsprogramms, der Bereitstellung von Elementarfaktoren und des Produktionsprozesses zu erfolgen. Dabei lässt sich diese in die Aufgabenbereiche Produktionsprogrammplanung, Bereitstellungsplanung und Produktionsprozessplanung unterteilen.<sup>253</sup>

Die *Produktionsprogrammplanung* legt dabei auf einem bestimmten zeitlichen und sachlichen Niveau die in einer Planungsperiode herzustellenden Erzeugnisse nach Art und Menge fest.<sup>254</sup>

Aufgabe der *Bereitstellungsplanung* ist es, die für die Produktion benötigten Elementarfaktoren in der vorgeschriebenen Zeit, Menge und Qualität am rechten Ort mit möglichst geringen Kosten bereitzustellen.<sup>255</sup>

Die *Produktionsprozessplanung*, welche die zeitliche-, räumliche und mengenmäßige Planung des Produktionsablaufs auf Wochen-, Tages- oder Stundenbasis zum Inhalt hat, lässt sich wiederum in drei Aufgabengebiete gliedern:

Die *Losgrößenplanung*, welche sich mit der Fragestellung beschäftigt, ob unter Berücksichtigung vorgegebener Restriktionen die Zusammenfassung von verschiedenen Fertigungsaufträgen zu Losen sinnvoll ist oder nicht.<sup>256</sup> „Unter einer (Produktions-) Losgröße versteht man dabei die Anzahl gleichartiger Objekte, die auf einem Arbeitsträger (Maschine) unmittelbar nacheinander ohne Rüstvorgänge zu fertigen sind.“<sup>257</sup>

Weiters erfolgt in der Produktionsprozessplanung die *Festlegung der Bearbeitungszeitpunkte*, also die Bestimmung der frühesten und spätesten Bearbeitungszeitpunkte auf Basis der vereinbarten Liefertermine.

<sup>253</sup> Vgl. Gutenberg (1983), S. 149.

<sup>254</sup> Vgl. Kern (1988), S. 169 f.

<sup>255</sup> Vgl. Domschke et al. (1993), S. 11.

<sup>256</sup> Vgl. Domschke et al. (1993), S. 15.

<sup>257</sup> Domschke et al. (1993), S. 15.

Die *Maschinenbelegungsplanung* als drittes Aufgabengebiet der Produktionsprozessplanung, welche nach der Festlegung der Losgröße und der Bearbeitungszeitpunkte die Hauptaufgabe der Produktionsprozessplanung darstellt, ist für die zeitliche Zuteilung der einzelnen Aufträge bzw. Lose auf die Aggregate verantwortlich.<sup>258</sup>

Betreffend der Produktionsplanung und deren Teilgebiete kann die Aussage getroffen werden, dass die Produktionsplanung eines hybriden Produktionssystems aufgrund der hohen Vielfalt an Systemelementen sowie deren Beziehungen und Wechselwirkungen zueinander, der Tatsache, dass die Planung der kontinuierlichen Fertigung nicht bzw. nur bedingt auf die anschließende diskrete Fertigung übertragbar ist, dem Vorhandensein ablaufbedingter Restriktionen aufgrund verfahrenstechnischer Bedingungen und den damit verbundenen reihenfolgeabhängigen Rüst-, Einstell- und Umstellzeiten der Aggregate und dem Auftreten nicht unterbrechbarer Produktionsvorgänge, sowie dem Vorliegen einer Mischform aus linearen, divergierenden, konvergierenden und zyklischen Materialflüssen, eine komplexe Aufgabe darstellt.<sup>259</sup> Diese Arbeit nimmt sich im Speziellen der Herausforderung der Abbildung des Zusammenhangs zwischen der festgelegten Produktionslosgröße und Reihenfolge und den logistischen Zielgrößen sowie der positiven Aufeinanderabstimmung derer an.

Damit ein hybrides Produktionssystem effizient genutzt werden kann, müssen zwischen den Bearbeitungsstationen der kontinuierlichen Fertigung auf die diskrete Produktion Puffer (Warterräume) vorgesehen werden.<sup>260</sup> Aufgrund der unterschiedlichen Produktionstechnologien, welche in der kontinuierlichen Fertigung auf physikalischen und chemischen Verfahren beruhen und daher je nach herzustellender Qualität und Zusammensetzung kaum veränderbaren Bearbeitungszeiten unterliegen, ist die Beeinflussung der Taktung des Fertigungsprozesses äußerst schwierig.<sup>261</sup> Im Fall der Gießerei eines Hüttenwerkes unterliegt der Aufschmelzungsprozess des Kupfers verfahrenstechnischen Bearbeitungszeiten, welche kaum beeinflusst werden können. Nur durch den Einsatz zweier nachgeschalteter Warmhalteöfen kann der Übergang auf die nachfolgenden Gießanlagen, in welchen der diskontinuierliche Abgießvorgang erfolgt, realisiert werden.<sup>262</sup> Die Bestimmung der Puffergröße stellt dabei ein Optimierungsproblem dar, bei der neben räumlichen bzw. kapazitiven Aspekten u.a. auch der Bestand an Halbfabrikaten sowie Interdependenzen zwischen benachbarten Stationen zu berücksichtigen sind. Wird der Puffer zwischen zwei Arbeitsstationen zu klein gewählt, um so eher treten Unterbrechungen im Produktionsprozess auf.<sup>263</sup> Unvorhergesehene Unterbrechungen wirken sich wiederum unmittelbar auf die logistischen Zielgrößen durch einen Anstieg der Durchlaufzeit, dem Aufbau von Beständen, einer Reduzierung der Auslastung und einer Verschlechte-

---

<sup>258</sup> Vgl. Domschke et al. (1993), S. 15.

<sup>259</sup> Vgl. Trautmann (2001), S. 1 f.

<sup>260</sup> Vgl. Tempelmeier (2005), S. 98.

<sup>261</sup> Vgl. Loos (1997), S. 46.

<sup>262</sup> Vgl. Kupferhütte (2011b), S. 20.

<sup>263</sup> Vgl. Tempelmeier (2008a), S. 98.

rung der Termintreue aus. Dies impliziert weiter einen Anstieg in den Produktionskosten, da u.a. der Leerkostenanteil (= Fixkostenanteil für ungenützte Kapazitäten) ansteigt.<sup>264</sup>

Nach der Charakterisierung eines hybriden Produktionssystems und der Betrachtung der Herausforderungen an ein solches, erfolgt nun ein Exkurs in die Kennlinientheorie, welche als Basis zur Beschreibung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen in Kapitel 4 Verwendung findet.

### 3.3 Kennlinientheorie

Als Ziel der Produktionslogistik kann das Professionalisieren der Gestaltung und des Betriebes logistischer Systeme bezeichnet werden.<sup>265</sup> Bei der Gestaltung als auch bei der Lenkung von unternehmenslogistischen Abläufen sind stets die Wechselwirkungen zwischen den Leistungs- und Kostenzielen des Unternehmens, welche anhand von Kennzahlen gemessen werden können, zu beachten, um die Wirtschaftlichkeit einer Produktion sicherstellen zu können. Kennzahlen informieren dabei über relevante Tatbestände und Zusammenhänge in einer einfachen und verdichteten Form.<sup>266</sup> Zur Visualisierung der Leistungs- und Kostenziele in Form von Kennzahlen, welche eine schnelle Deutung und Interpretation von Ergebnissen ermöglichen, können unterschiedliche graphische Darstellungen genutzt werden. In der Literatur sind im Wesentlichen vier Möglichkeiten zur Visualisierung logistischer Leistungsziele bekannt: Verteilungsfunktionen, Trenddiagramme, Durchlaufdiagramme und Kennlinien. Da in dieser Arbeit die Darstellung der Leistungs- und Kostenziele eines Produktionssystems anhand von Kennlinien erfolgt, wird nach der Diskussion der unterschiedlichen Modellierungsansätze von Produktionskennlinien auf die Kennlinientheorie, welche neben der Simulation als experimentellen Ansatz und der Warteschlangentheorie als deduktiven Ansatz, den deduktiv-experimentellen Ansatz darstellt, im Detail eingegangen.<sup>267</sup>

Mit Hilfe der *Simulation*, der *Kennlinientheorie* und der *Warteschlangentheorie* können die Zusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen je nach verwendetem Ansatz mehr oder weniger detailliert beschrieben werden:<sup>268</sup>

Durch Einsatz eines *Simulationsmodells* können reale Systeme mit Hilfe einer geeigneten Simulationssoftware nachgebildet und deren Verhalten bei sich verändernden Rahmenbedingungen analysiert und beschrieben werden. Simulationen zeichnen sich in der Regel durch einen relativ geringen Erstellungsaufwand, der Möglichkeit der Modelladaptation, dadurch dass auch Einzelergebnisse beschreibbar sind und einer hohen Akzeptanz vor allem in der betrieblichen Praxis durch die Möglichkeit der graphischen Animation, aus. Dem ge-

---

<sup>264</sup> Vgl. Thommen (2004), S. 400.

<sup>265</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 186.

<sup>266</sup> Vgl. Reichmann (1995), S. 19.

<sup>267</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 1-30.

<sup>268</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 189 ff.

genüber stehen die Nachteile, dass sich die Modellgültigkeit nur punktuell nachweisen lässt und der Neuaufbau bzw. die Anpassung eines Modells für jeden Anwendungsfall erforderlich ist, um daraus brauchbare Ergebnisse zu erzielen. Dies impliziert einen hohen Anwendungsaufwand und auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist in der Regel nicht möglich.

Eine weitere Möglichkeit der Modellierungsansätze zur Erstellung von Kennlinien liefert die *Warteschlangentheorie*. Bei der Abbildung der Kennlinien mit Hilfe der Warteschlangentheorie wird ein *M/G/1-Modell*<sup>269</sup> zur Beschreibung des Produktionssystems zugrundegelegt. Die Warteschlangentheorie ermöglicht zwar die Ableitung der Modellstruktur und -parameter aus elementaren Gesetzmäßigkeiten und erfordern in der Regel einen geringen Anwendungsaufwand, jedoch ist die Modelladaption nicht bzw. nur in sehr engen Grenzen realisierbar (strenggenommen gilt das *M/G/1-Modell* nur für einen Anwendungsfall).<sup>270</sup> Die dabei verwendeten Beschreibungsgrößen, Annahmen und Voraussetzungen werden vor allem darin kritisiert, dass diese in realen, implizit in komplexeren Produktionssystemen, nicht gegeben sind und daher eine geringe Praxistauglichkeit aufweisen.

Die *Kennlinientheorie* ermöglicht es, die Abhängigkeiten zwischen den logistischen Zielgrößen eines Produktionsprozesses (siehe dazu Abschnitt 3.3.2) und deren Beeinflussungsmöglichkeiten mit einem vergleichsweise einfachen mathematischen Modell zu beschreiben.<sup>271</sup> Diese beinhaltet laut Definition „die Visualisierung des Zusammenhangs logistischer Kennzahlen.“<sup>272</sup> Die Grundlage von Kennlinien sind geeignete Beschreibungsmodelle, welche zur Beschreibung des Einflusses einer logistischen Eingangsgröße auf Ausgangsgrößen eingesetzt werden.<sup>273</sup> Durch die Anwendung logistischer Kennlinien, welche auf logistischen Wirkmodellen beruhen und den Zusammenhang zwischen mehreren Kennzahlen abbilden, kann das Verhalten eines Produktionssystems beschrieben und der Einfluss künftiger Maßnahmen beurteilt werden, weshalb diese Darstellungsform gerade in der Planung und Steuerung logistischer Systeme vermehrt Einsatz findet.<sup>274</sup> Als großer Vorteil der Kennlinientheorie ist hervorzuheben, „[...]dass das zugrundeliegende Modell an veränderte Bedingungen in weiten Bereichen allein durch seine Parametrisierung adaptiert werden kann.“<sup>275</sup> Zudem zeichnet sich die Kennlinientheorie dadurch aus, dass die Modellstruktur und -parameter fast vollständig aus elementaren Gesetzmäßigkeiten abgeleitet wurden. Der Nachteil der Kennlinientheorie liegt in der Beschränkung auf die Ressourcensicht, wodurch sich der Durchlauf einzelner Aufträge durch die Produktion nicht abbilden lässt. Aufgrund der Tatsache, dass sich die elementaren Zusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen innerhalb der Anwendungsvoraussetzungen auf einer allgemein gültigen Ebene beschreiben lassen, können diese zur Verständ-

<sup>269</sup> Kendall-Lee Notation: wobei M: Ankunftszeiten sind exponentialverteilt; G: Bearbeitungszeiten sind durch allgemeine Verteilung geregelt; 1: Warteschlangensystem enthält eine Bedienstation; siehe ausführlich dazu Winston (2004), S. 1051 ff.

<sup>270</sup> Vgl. Nyhuis et al. (1999), S. 48.

<sup>271</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 190.

<sup>272</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 189.

<sup>273</sup> Arnold et al. (2004), S. A 1.

<sup>274</sup> Vgl. Nyhuis (1999) in Arnold et al. (2004), S. A 1-30.

<sup>275</sup> Nyhuis (2008), S. 190.

nientwicklung für das statische und dynamische Systemverhalten von Produktionssystemen verwendet werden.<sup>276</sup> Im Vergleich zu den beiden im Vorhinein beschriebenen Modellierungsansätzen zeichnet sich die Kennlinientheorie durch ein besonders günstiges Verhältnis von Abbildungsgüte und Anwendungsaufwand aus, weshalb dieser Ansatz zur Abbildung der Zusammenhänge der logistischen Zielgrößen gewählt wurde.

Die Grundzüge der Kennlinientheorie mit ihren verschiedenen Modellbausteinen werden nun im Nachfolgenden erörtert.

### 3.3.1 Grundlagen zu logistischen Kennlinien

Den Ausgangspunkt der Entwicklung aller Teilmodelle der Kennlinientheorie bildet die Definition des Durchlaufelements (siehe dazu Abbildung 21).<sup>277</sup>

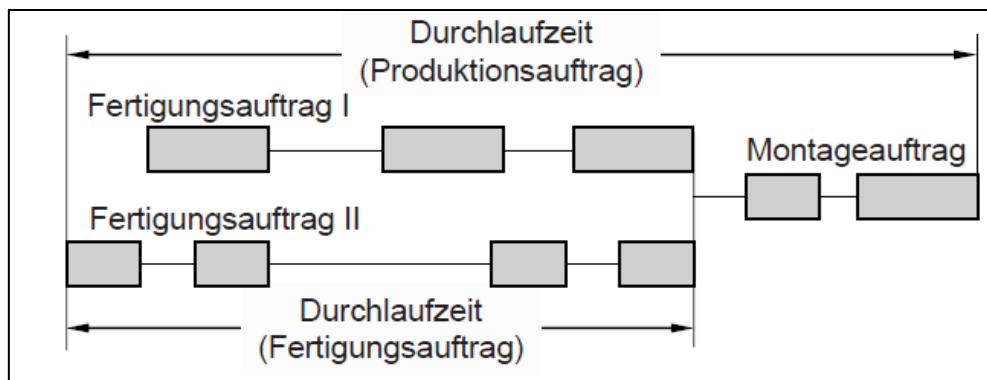


Abbildung 21: Definition des Durchlaufelements<sup>278</sup>

Dabei erfolgt die Darstellung des Durchlaufs eines aus zwei Fertigungsaufträgen und einem Montageauftrag bestehenden Produktionsauftrags. Darin abgebildet ist eine losweise Fertigung bei welcher nach Beendigung eines Arbeitsvorganges und einer eventuellen Liegezeit am entsprechenden Arbeitssystem der Weitertransport zum nachfolgenden Arbeitssystem abgebildet ist. Das ankommende Los trifft dort in der Regel auf eine Warteschlange, in welcher es bis zur Fertigstellung der vorangegangenen Aufträge verweilen muss. Sind die notwendigen Kapazitäten zur Auftragsabarbeitung frei, kann die Umrüstung des Arbeitssystems erfolgen und die anschließende Bearbeitung des Loses gestartet werden. Dieser Zyklus endet mit der Fertigstellung des letzten Arbeitsvorganges des Auftrags. Demnach kann die Durchlaufzeit für einen Arbeitsschritt als die Zeitspanne verstanden werden, die bei der Produktion eines Gutes zwischen dem Beginn des ersten Arbeitsvorganges und dem Ende des letzten Arbeitsvorganges in einer definierten Messstrecke verstreicht.<sup>279</sup> Die Durchlaufzeit in der Produktion setzt sich somit aus den Komponenten Bearbeitungszeiten, Transportzeiten von und zu den Betriebsmitteln, Kontrollzeiten, Liege- und Wartezeiten vor und hinter den Betriebsmitteln,

<sup>276</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 190 f.

<sup>277</sup> Vgl. Wiendahl (1987) in Nyhuis (2008), S. 191.

<sup>278</sup> Nyhuis (2008), S. 192.

<sup>279</sup> Vgl. Pawellek (2007), S. 33.



zusammen. Die Liege- und die arbeitsablaufbedingten Wartezeiten nehmen dabei den größten Anteil der Durchlaufzeit ein.<sup>280</sup>

Das Durchlaufelement bildet auch die Basis für das Trichtermodell. Beim Trichtermodell (siehe dazu Abbildung 22) handelt es sich um ein Beschreibungsmodell, mit welchem der tatsächliche oder geplante Zustand eines Systems abgebildet werden kann.<sup>281</sup> Das Trichtermodell beschreibt das Durchlaufverhalten eines jeden Arbeitssystems anhand der Größen Zugang, Bestand und Abgang. Der Bestand bildet dabei jene Aufträge ab, welche bei einem Arbeitssystem ankommen bzw. jene Lose, welche zu bearbeiten sind. Die Trichteröffnung selbst steht für die Leistung bzw. den Durchsatz (Throughput) des Arbeitssystems, welche(r) innerhalb der Kapazitätsgrenzen variiert werden kann. Je größer dabei die Differenz zwischen dem Auftragszugang und dem Durchsatz des Arbeitssystems ist, desto größer ist der wartende Bestand.<sup>282</sup>

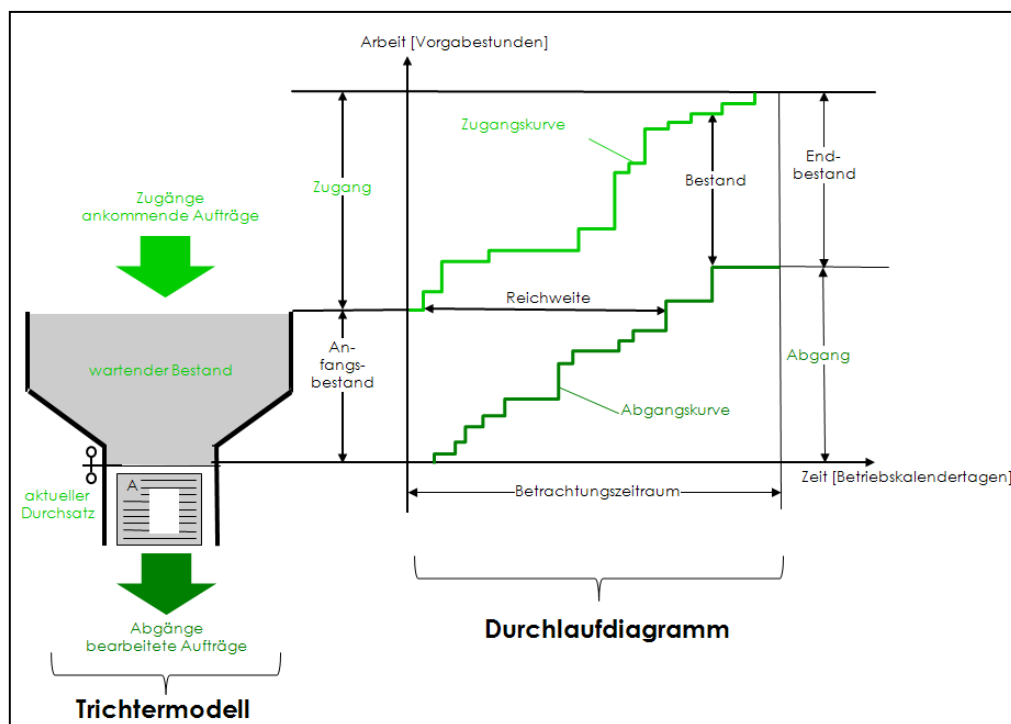


Abbildung 22: Trichtermodell und Durchlaufdiagramm<sup>283</sup>

Die Ergebnisse am Trichter lassen sich in ein Durchlaufdiagramm (siehe dazu Abbildung 22) übertragen, in welchem die Auftragszu- und -abgänge kumulativ aufgetragen und in zwei separaten Kurven dargestellt werden. Dabei bilden die fertig gestellten Aufträge mit ihrem Arbeitsinhalt (in Vorgabestunden) die Abgangskurve und die Auftragszugänge mit ihrem Arbeitsinhalt über dem Zugangstermin stellen analog die Zugangskurve dar. Somit lassen sich der Gesamtzugang und -abgang an Aufträgen, die Leistung, der Bestand und die Durchlauf-

<sup>280</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 192.

<sup>281</sup> Vgl. Kerner (2002), S. 11.

<sup>282</sup> Vgl. Kiener et al. (2006), S. 24 f.

<sup>283</sup> In Anlehnung an Bechte (1984), S. 14.

zeit des Arbeitssystems abbilden.<sup>284</sup> Durch das Durchlaufdiagramm können das dynamische Systemverhalten sowohl qualitativ als auch zeitgenau dargestellt und die Wirkungszusammenhänge zwischen den einzelnen logistischen Zielgrößen aufgezeigt werden. Davon lassen sich grundlegende Informationen über die Produktionsabläufe ableiten und hinsichtlich verschiedener Fragestellungen analysieren. Das Auffinden von Planabweichungen wird ebenso unterstützt wie das Ableiten von Steuerungsmaßnahmen.<sup>285</sup> Zudem lassen sich aus dem Durchlaufdiagramm mathematische Zusammenhänge ermitteln.

Der Zusammenhang zwischen Bestand, Durchlaufzeit und Leistung wird in der so genannten Trichterformel abgebildet (siehe Gleichung 1). Diese besagt, dass die Reichweite eines Arbeitssystems durch das Verhältnis von Bestand zu Leistung bestimmt wird.

$$R_m = \frac{B_m}{L_m} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Dabei steht  $R_m$  für die mittlere Reichweite,  $B_m$  für den mittleren Bestand und  $L_m$  für die mittlere Leistung. Die Trichterformel spiegelt ident denselben Sachverhalt wie die Formel für die mittlere Verweildauer eines Wartesystems (siehe Gleichung 2), welche in der Warteschlangentheorie Anwendung findet, wider.

$$W = \frac{L}{\lambda} \quad (\text{Gleichung 2})$$

Wobei  $W$  die mittlere Verweildauer,  $L$  die mittlere Anzahl der Einheiten im System und  $\lambda$  die mittlere Ankunftsrate beschreibt.

Berücksichtigung hat die Tatsache zu finden, dass die Trichterformel nur dann exakt gilt, wenn keine Reihenfolgevertauschungen stattfinden, d.h. die Prioritätsregel FIFO (First In-First Out) herrscht und im Bezugszeitraum nur eine Bestandsart vorhanden ist. Je weniger diese Voraussetzungen erfüllt sind, desto größer ist der Fehler der Trichterformel. Dieser kann durch die Verwendung von Simulationen<sup>286</sup> oder speziellen Warteschlangenmodellen ausgeglichen werden.<sup>287</sup>

Mit dem Durchlaufdiagramm kann wie bereits erwähnt das logistische Systemverhalten dokumentiert werden. Die Wirkungszusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen sind damit jedoch nicht vollständig erklärbar. Die Fragestellungen nach der geringsten Durchlaufzeit bei bestimmten Fertigungs- und Auftragsstrukturen, der Höhe der Bestände um Leistungseinbußen zu vermeiden und die Frage mit Hilfe welcher Maßnahmen sich welche Rationalisierungspotenziale erschließen lassen, bleiben unbeantwortet. Eine Unterstützung zur Beantwortung dieser Fragestellungen können die Produktionskennlinien, welche als das Wirkmodell der

<sup>284</sup> Vgl. Kerner (2002), S. 15.

<sup>285</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 194.

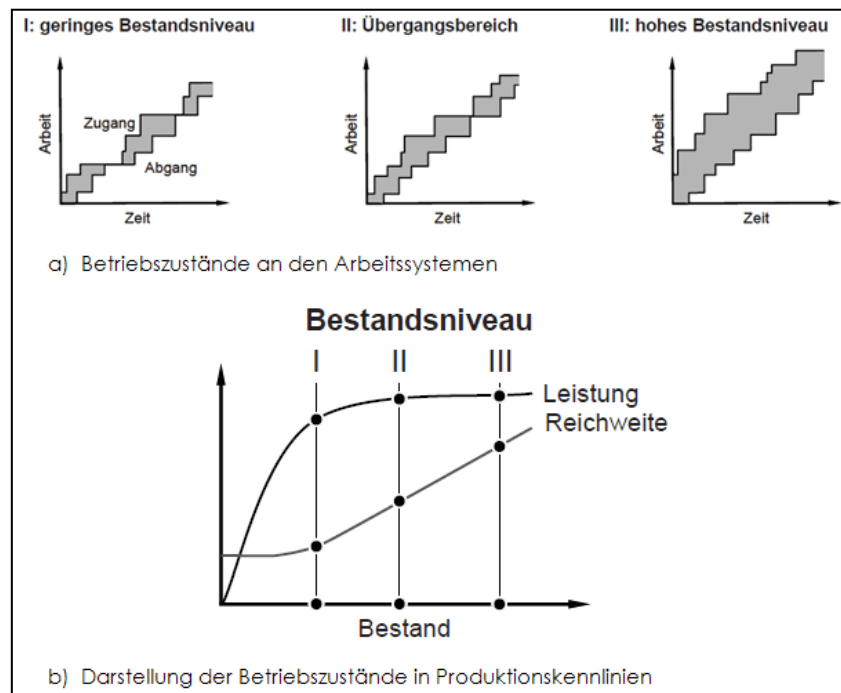
<sup>286</sup> Zur kennliniengestützten Logistiksimation siehe Wachsmann (2006).

<sup>287</sup> Zu Warteschlangenmodellen in der Logistik siehe Zimmermann (2007).

Produktionslogistik bezeichnet werden und die Basis für die Simulation von Produktionssystemen darstellen, liefern.<sup>288</sup>

### 3.3.2 Wirkungszusammenhänge logistischer Zielgrößen

Mit Hilfe von Produktionskennlinien (siehe Abbildung 23, Teil b) lassen sich die aus dem Durchlaufdiagramm eines Arbeitssystems abgeleiteten, auftretenden Betriebszustände (siehe Abbildung 23, Teil a) darstellen.



**Abbildung 23: Betriebszustände und Produktionskennlinien eines Arbeitssystems<sup>289</sup>**

In Abbildung 23, Teil a sind die Betriebszustände an einem Arbeitssystem abgebildet. Dabei weist der erste Betriebszustand ein sehr geringes Bestandsniveau auf. Dies hat zur Folge, dass bei den Aggregaten Leerzeiten entstehen können, da auf ankommende Erzeugnisse gewartet werden muss. Die Auslastung des Arbeitssystems ist damit sehr gering und der gesamte Fertigungsbestand befindet sich in Bearbeitung.<sup>290</sup> Ein geringer Bestand beeinflusst jedoch die Durchlaufzeit positiv, da durch die Senkung des mittleren Bestandes die mittlere Durchlaufzeit am Arbeitssystem, welche als Differenz von mittlerem Bestandzugang und -abgang definiert ist, verringert werden kann (siehe Abbildung 24).<sup>291</sup> <sup>292</sup> Kurze Durchlaufzeiten führen generell zu einer geringen Terminabweichung und sind somit meist mit einer hohen Termintreue verbunden. Zu geringe Bestände und die damit verbundenen Leistungseinbußen können jedoch auch zu einer Erhöhung der Terminabweichung führen.<sup>293</sup>

<sup>288</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 196.

<sup>289</sup> In Anlehnung an Nyhuis et al. (2006), S. 37.

<sup>290</sup> Vgl. Reinsch (2003), S. 14.

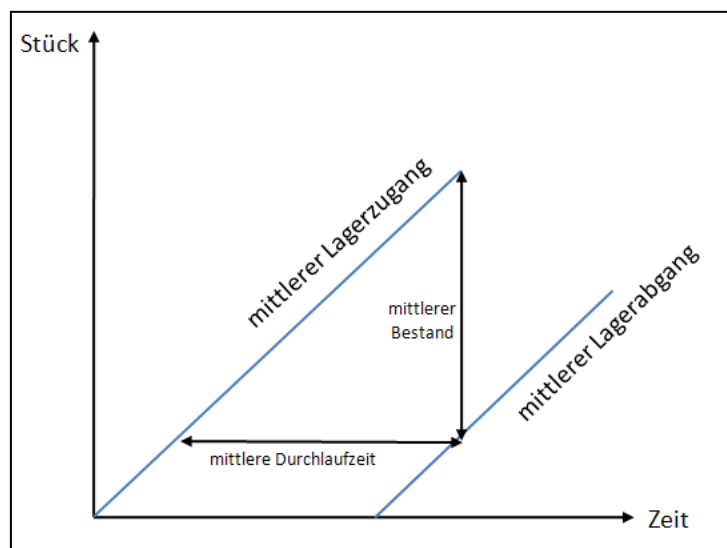
<sup>291</sup> Vgl. Teich (2002), S. 296.

<sup>292</sup> Vgl. Nyhuis et al. (2006), S. 37.

<sup>293</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 189.

Im Übergangsbereich (siehe dazu Abbildung 23, Teil a) findet man ein mittleres Bestandsniveau, in welchem Bestandszugänge und -abgänge aufeinander abgestimmt sind. Dabei stehen die Durchlaufzeit, die Kapazitätsauslastung und die Termintreue in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander, wodurch dieser Zustand auch oftmals als optimaler Bereich bezeichnet wird. Jedoch sei angemerkt, dass keine der logistischen Zielgrößen dabei ein Optimum annimmt.<sup>294</sup>

Im dritten Betriebszustand (Abbildung 23, Teil a) ist das Arbeitssystem maximal ausgelastet, wodurch ein hohes Bestandsniveau erreicht wird.<sup>295</sup> Dies wiederum bewirkt eine Erhöhung der mittleren Durchlaufzeit aufgrund des Anstiegs an Wartezeiten vor den Arbeitsaggregaten und auch die Planbarkeit der Arbeitssysteme aufgrund der höheren Durchlaufzeitenstreuung und die Termintreue werden negativ beeinflusst bzw. verschlechtern sich.<sup>296</sup>



**Abbildung 24: Zusammenhang Lagerbestand und Durchlaufzeit<sup>297</sup>**

Der eben beschriebene Wirkungszusammenhang und der daraus resultierende Zielkonflikt der logistischen Zielgrößen Auslastung (der Aggregate), Bestandshöhe, Durchlaufzeit und Termintreue wird in der Literatur als das „Dilemma der Ablaufplanung“ bezeichnet (siehe dazu Abbildung 25). Mit Hilfe der Produktionskennlinien kann dieser Zusammenhang veranschaulicht werden und macht klar, dass eine gleichzeitige Optimierung aller genannten Zielgrößen nicht realisierbar ist. Je nach Unternehmensstrategie hat daher die Fokussierung der Optimierung einer primären Zielgröße zu erfolgen, um davon ausgehend die Auswirkungen auf die anderen logistischen Zielgrößen beurteilen zu können.<sup>298</sup>

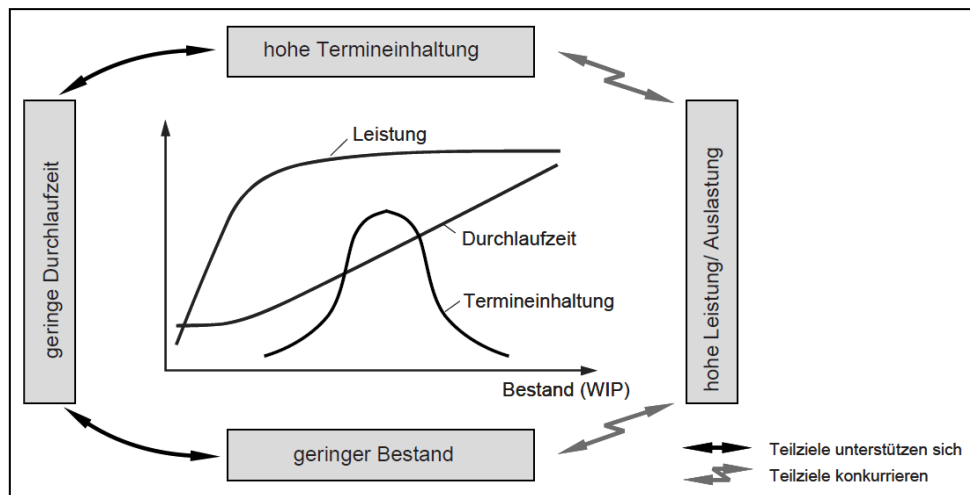
<sup>294</sup> Vgl. Reinsch (2003), S. 14.

<sup>295</sup> Vgl. Schuh (2006), S. 487.

<sup>296</sup> Vgl. Wachsmann (2006), S. 20.

<sup>297</sup> In Anlehnung an Teich (2002), S. 297.

<sup>298</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 188.



**Abbildung 25: Visualisierung des Dilemmas der Ablaufplanung mit Produktionskennlinien**<sup>299</sup>

Die Produktionskennlinien stellen somit ein wertvolles Instrumentarium zur Darstellung der Wirkungszusammenhänge der logistischen Zielgrößen eines Unternehmens dar.

Die grundsätzliche Form der Produktionskennlinien gilt dabei für jedes beliebige Produktionssystem: Bestandsreduzierungen führen zu einer Reduzierung der Durchlaufzeiten, aber ebenso auch zu Materialflussabbrissen und somit zu Auslastungsverlusten. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die spezifischen Ausprägungen der Kennlinien für das jeweils betrachtete Arbeitssystem von unterschiedlichen Rahmenbedingungen wie der Kapazität der Aggregate, dem Mittelwert und der Streuung der abzuarbeitenden Aufträge und der Art und Weise wie die Einbindung des Systems in den Materialfluss erfolgt, abhängig sind.

Im nachfolgenden Abschnitt 3.3.3 wird nun auf die Anwendungsmöglichkeiten von logistischen Kennlinien in der Produktion im Rahmen der Modellierung eingegangen.

### 3.3.3 Anwendungsmöglichkeiten von Produktionskennlinien im Rahmen der Modellierung

Die Kennlinientheorie bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten um logistische Rationalisierungspotenziale zu quantifizieren und dadurch Produktionsprozesse logistikorientiert gestalten und lenken zu können.

Um Produktionskennlinien mit einem geringen Aufwand zu erstellen und damit die Praxisrelevanz dieser zu erhöhen, wurde im Rahmen der Ableitung der Kennlinientheorie ein mathematischer Ansatz entwickelt, welcher unter Zuhilfenahme einer Approximationsgleichung<sup>300</sup> die Berechnung logistischer Produktionskennlinien mit einer hohen Abbildungsgenauigkeit ermöglicht (siehe dazu Gleichungen 3 bis 5).<sup>301</sup>

$$B_m(t) = BI_{min} \cdot \left(1 - \left(1 - \sqrt[4]{t}\right)^4\right) + BI_{min} \cdot \alpha_1 \cdot t \quad (\text{Gleichung 3})$$

<sup>299</sup> Nyhuis (2008), S. 188.

<sup>300</sup> Siehe Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung, Nyhuis (1991) in Nyhuis (2008), S. 197.

<sup>301</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 198.

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

$$R_m(t) = \frac{B_m(t)}{L_m(t)} \quad (\text{Gleichung 5})$$

Wobei  $B_m(t)$  der mittlere Bestand,  $L_m(t)$  die mittlere Leistung,  $R_m(t)$  die mittlere Reichweite,  $BI_{min}$  der ideale Mindestbestand,  $L_{max}$  die maximal mögliche Leistung,  $\alpha_1$  der Streckfaktor (empirisch ermittelter Parameter), welcher den Zusammenhang zwischen der Belastungsstreuung und der Kapazitätsflexibilität einerseits und den erforderlichen Bestandspuffer andererseits beschreibt, und  $t$  die Laufvariable im Bereich  $(0 \leq t \leq 1)$  bedeuten.<sup>302</sup>

Die Basis dieser Gleichungen, welche die Erstellung von Produktionskennlinien auf der Grundlage weniger Daten ermöglichen, repräsentieren einen deduktiv-empirischen Modellierungsansatz. Jedoch stellt sich die Frage, ob der entwickelte mathematische Ansatz (für die Beschreibung der berechneten Kennlinien wird eine  $C_{Norm}$ -Funktion angenommen), welcher hinter der Approximationsgleichung steckt, als best möglicher Ansatz gesehen werden kann, oder ob mit Hilfe eines anderen Ansatzes eine bessere Beschreibung der logistischen Zielgrößen erzielt werden kann. Diese Frage wird im Abschnitt 3.3.3.1 (Erläuterungen zu den bestehenden Ansätzen der Kennlinienmodellierung) diskutiert.

Dem deduktiven Modellanteil der Kennlinientheorie liegt die Annahme eines idealen Produktionsprozesses zugrunde, welcher in einem idealen Durchlaufdiagramm dargestellt ist (siehe Abbildung 26, a).<sup>303</sup> Ein logistisch idealer Produktionsprozess zeichnet sich dadurch aus, dass sich zu jedem Zeitpunkt genau ein Auftrag am Arbeitssystem befindet. Dies bedeutet, dass keine Wartezeiten für ankommende Aufträge entstehen, noch entstehen Leerzeiten an den Aggregaten. Somit lässt sich der Bestand an einem Arbeitssystem unmittelbar aus den Auftragszeiten der zu bearbeiteten Aufträge ableiten.<sup>304</sup> <sup>305</sup> Darauf aufbauend lassen sich unter der Annahme, dass die maximale Leistung des Arbeitssystems als bekannt vorausgesetzt werden kann, ideale Produktionskennlinien erstellen (siehe Abbildung 26, b).<sup>306</sup>

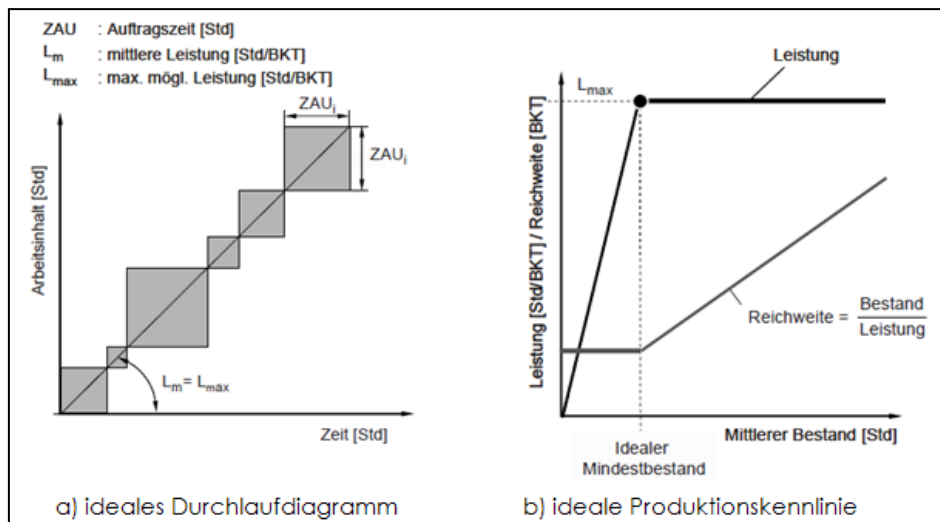
<sup>302</sup> Siehe Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung, Nyhuis (1991) in Nyhuis (2008), S. 197.

<sup>303</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 199.

<sup>304</sup> Anmerkung: Dies gilt unter der Annahme eines losweisen Transportes und vernachlässigbarer Transportzeiten.

<sup>305</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 199 ff.

<sup>306</sup> Zur idealen Leistungskennlinie siehe Wendemeyer (1989) und Nyhuis (1991) in Nyhuis (2008), S. 199.



**Abbildung 26: Ideales Durchlaufdiagramm und ideale Produktionskennlinie**<sup>307</sup>

In der Praxis sind in der Regel die zur Ableitung der idealen Produktionskennlinien notwendigen Voraussetzungen nicht gegeben. Insbesondere in komplexen Fertigungsbereichen wie beispielsweise einem hybriden Produktionssystem mit unterschiedlichsten Materialflussstrukturen etc. sind zahlreiche Einflussfaktoren wie die Streuung des Auftragszuganges oder dynamische Engpassituationen zu beobachten, die eine Abweichung der realen Produktionskennlinie vom idealisierten Zustand bewirken. Dennoch lassen sich unter Zuhilfenahme geeigneter Simulationsmodelle diese Abweichungen analysieren und somit können ideale Produktionskennlinien als „Bezugskordinatensystem“ für die simulativ ermittelten Produktionskennlinien angewandt werden. Es kann jedoch die Annahme getroffen werden, dass die Abweichungen von den simulierten auf die idealen Produktionskennlinien von denselben Größen abhängig sind, welche auch die idealen Kennlinien bestimmen. So muss beispielsweise der Bestandspuffer an einem Arbeitssystem umso größer ausgelegt werden, je größer die Auftragszeiten und deren Streuungen sind und je größer demnach der ideale Mindestbestand ist. Darüber hinaus beeinflussen auch die Kapazitätsflexibilität und die Belastungsstreuung das logistische Leistungsverhalten eines Arbeitssystems. Diese Einflüsse werden im Streckfaktor  $\alpha_1$  zusammengefasst.<sup>308</sup> Eine Übersicht der Parameter der Approximationsgleichung zur Ermittlung der Produktionskennlinien gibt die nachfolgende Abbildung 27.

<sup>307</sup> Nyhuis (2008), S. 198.

<sup>308</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 199 f.

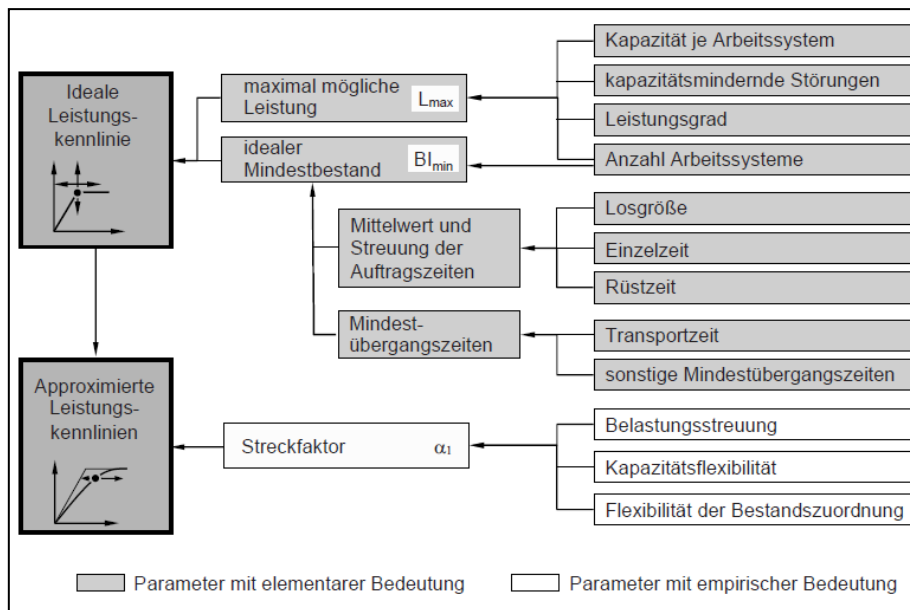


Abbildung 27: Basismodell zur Parameterberechnung von Produktionskennlinien<sup>309</sup>

Bezugnehmend auf das Basismodell in Abbildung 27 werden auch etwaige Transportzeiten sowie weitere prozessbedingte Übergangszeiten wie beispielsweise technologisch bedingte Liegezeiten, welche sich bestands- und durchlaufzeiterhöhend auswirken können, berücksichtigt. Die Daten zur Berechnung der idealen Produktionskennlinien liegen meist direkt im Unternehmen vor und können meist mit einem geringen Aufwand aus den eingesetzten Controlling-Tools bzw. PPS-Systemen ermittelt werden. Da es sich beim Streckfaktor um eine empirisch ermittelte Größe handelt, muss dieser in jedem Anwendungsfall hinsichtlich seiner Gültigkeit überprüft werden. Anzumerken ist, dass mit der Festlegung des Streckfaktors mit dem Standardwert  $\alpha_1=10$  in der Regel eine realitätsnahe Beschreibung der Wirkungszusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen erreicht werden kann.<sup>310</sup>

### 3.3.3.1 Bestehende Ansätze der Kennlinienmodellierung

Wie bereits im Vorhinein erwähnt, wird nun die Beurteilung der bestehenden Ansätze zur Kennlinienmodellierung diskutiert. Da zur Beschreibung des Kennlinienverlaufes eine beliebige Funktion ( $C_{Norm}$ -Funktion) gewählt wurde, stellt diese Funktion nur eine von vielen Möglichkeiten zur Beschreibung des Kennlinienverlaufs dar. Kritik wird vor allem dahingehend geübt, dass die von Nyhuis und Wiendahl entwickelte Funktion zwar eine sehr gute Annäherung an berechnete Kennlinien darstellt, welche auch anhand zahlreicher Simulationen verifiziert wurde, jedoch herrscht dahingehend Forschungsbedarf bzw. muss kritisch hinterfragt werden, ob durch die Hinterlegung bzw. Wahl einer anderen Funktion bzw. eines anderen Ansatzes eine bessere Annäherung bzw. Beschreibung des Kennlinienverlaufs erreicht werden kann.

<sup>309</sup> Nyhuis (2008), S. 200.

<sup>310</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 204.



Bevor nun auf die Entwicklung einer anderen Basisfunktion zur Beschreibung der Kennlinien eingegangen wird, erfolgen die Erläuterungen zur Ableitung der Näherungsgleichung für berechnete Kennlinien nach Nyhuis und Wiendahl:<sup>311</sup>

Zur Berechnung der logistischen Leistungskennlinie wurde eine mathematische Funktion gewählt, welche den Anforderungen genügt, dass diese durch denselben Ursprung (0/0) des Koordinatensystems wie bei idealen Kennlinien verlaufen muss bzw. dort zu beginnen hat. Ebenso muss bei endlich hohen Beständen eine Vollausslastung des Systems erreicht werden und die gewählte Funktion muss durch Parameter im Abnickpunkt an die ideale Kennlinie angeschmiegt werden können. Diese Bedingungen werden von der gewählten  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion  $|x|^c + |y|^c = 1$  erfüllt. Darauf aufbauend wurde, um diese Funktion mathematisch beschreiben zu können, die Parametrisierung durch die Bildung der Funktionen  $x(t)$  (Gleichung 6) und  $y(t)$  (Gleichung 7) vorgenommen:

$$x(t) = t \tag{Gleichung 6}$$

wobei

$t$  Laufvariable

$$y(t) = -\sqrt[c]{1 - t^c} \tag{Gleichung 7}$$

Im Anschluss daran erfolgte in vier Schritten die affine Transformation der  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion an den Verlauf der idealen Kennlinie (Schritte dazu siehe in Abbildung 28 a) bis d)<sup>312</sup>).

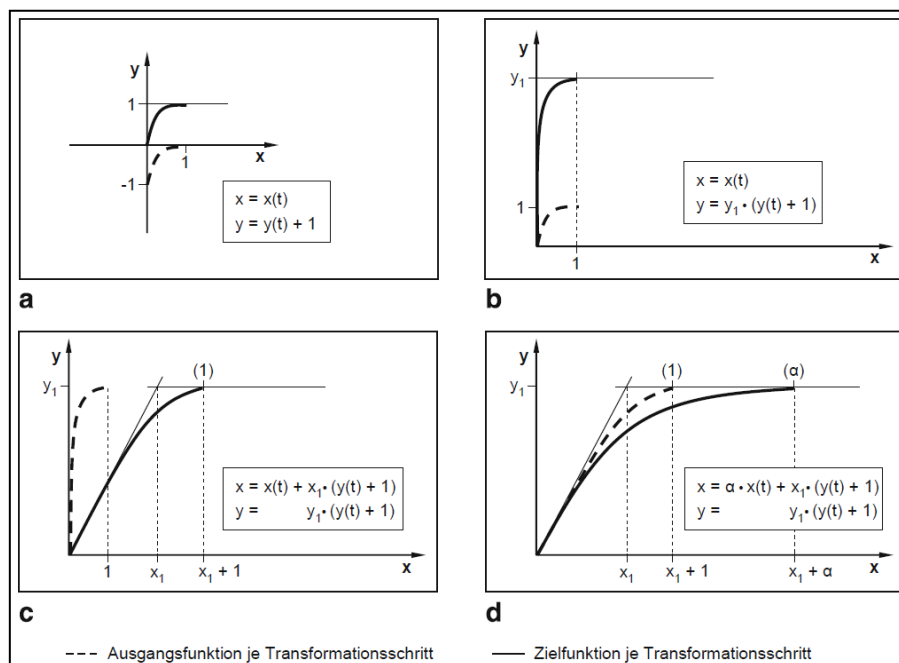


Abbildung 28: Schritte der affinen Transformation<sup>313</sup>

<sup>311</sup> Vgl. Nyhuis et al. (1999), S. 71 ff.

<sup>312</sup> Schritte: a) Verschieben ( $y$ -Richtung), b) Strecken ( $y$ -Richtung), c) Scheren ( $x$ -Richtung), d) Strecken ( $x$ -Richtung).

<sup>313</sup> Nyhuis et al. (2012), S. 73.

Somit ergibt sich, wenn man  $x(t)$  und  $y(t)$  durch die parametrisierten Funktionen der  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion ersetzt (siehe Gleichungen 8 und 9):

$$x = x_1 \cdot \left(1 - \sqrt[c]{1 - t^c}\right) + \alpha_1 \cdot x_1 \cdot t \quad (\text{Gleichung 8})$$

$$y = y_1 \cdot \left(1 - \sqrt[c]{1 - t^c}\right) \quad (\text{Gleichung 9})$$

Diese Funktion ist jedoch nur innerhalb der Grenzen ( $0 \leq t \leq 1$ ) definiert. Bei  $t = 0$  ergeben sich für  $x$  und  $y$  ebenfalls die Werte 0. Somit ist die Bedingung, dass die Funktion bei  $t = 0$  im Ursprung des Koordinatensystems beginnt, erfüllt.

Für  $t = 1$ , welcher den Maximalwert der Funktion in  $x$ - und  $y$ -Richtung darstellt, ergibt sich für die Gleichungen 8 und 9:

$$x = (\alpha_1 + 1) \cdot x_1 \quad (\text{Gleichung 10})$$

$$y = y_1 \quad (\text{Gleichung 11})$$

Mit Hilfe der Gleichungen 8 und 9 kann die Berechnung einer kennlinienähnlichen Funktion über vier Parameter erfolgen. Neben den Parametern  $x_1$  und  $y_1$ , die dem Mindestbestand bzw. der maximal möglichen Leistung entsprechen, sind die konkreten Werte für die Funktionswerte  $C$  und  $\alpha_1$  zu bestimmen. Der Wert  $C$  der  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion gibt an, wie stark sich die berechnete Kennlinie an den Abknickpunkt der idealen Kennlinie anschmiegt. Bei  $C = 0$  würde sich die berechnete Kennlinie mit der idealen decken. Nyhuis und Wiendahl haben zur Bestimmung des Wertes für  $C$  die Annahme getroffen, dass im originalen Koordinatensystem der Schnittpunkt der  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion mit der Winkelhalbierenden als Abknickpunkt aufzufassen ist (siehe dazu Abbildung 29).

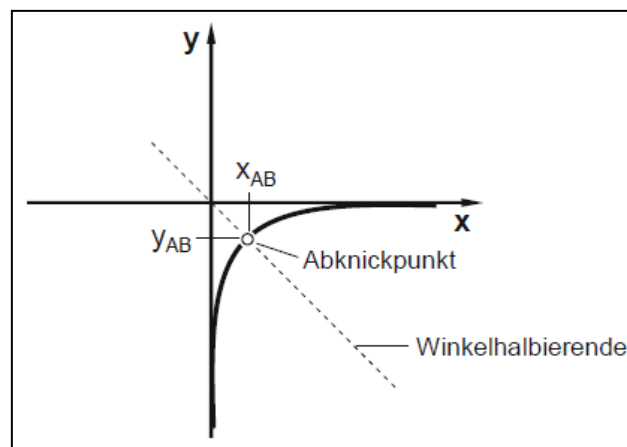


Abbildung 29: Definition Abknickpunkt (nach Nyhuis und Wiendahl)<sup>314</sup>

Die sich aus den ergebenden Koordinaten des Punktes  $(x_{AB}, y_{AB})$  resultierende Beziehung  $x_{AB} = -y_{AB}$  wird in die die Parametergleichung der  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion eingesetzt, um jenen Wert,

<sup>314</sup> Nyhuis et al. (2012), S. 77.

welchen die Laufvariable  $t_{AB}$  in diesem Punkt annimmt, bestimmen zu können (siehe dazu Gleichungen 12 und 13).

$$x_{AB} = t_{AB} \quad (\text{Gleichung 12})$$

$$y_{AB} = -t_{AB} = -\sqrt{1 - t_{AB}^c} \quad (\text{Gleichung 13})$$

Daraus folgt für  $t_{AB}$ :

$$t_{AB} = \sqrt{\frac{1}{2}} \quad (\text{Gleichung 14})$$

Setzt man nun den für  $t_{AB}$  ermittelten Wert in die Koordinaten des Abnickpunktes  $(x_{AB}, y_{AB})$  ein, so erhält man (siehe Gleichungen 15 und 16):

$$x_{AB} = \sqrt{\frac{1}{2}} \quad (\text{Gleichung 15})$$

$$y_{AB} = -\sqrt{\frac{1}{2}} \quad (\text{Gleichung 16})$$

Anschließend wird der ermittelte Wert  $t_{AB}$  in die Parametergleichung der Leistungskennlinien (in die Gleichungen 8 und 9) eingesetzt:

$$x = x_1 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{1}{2}}\right) + \alpha_1 \cdot x_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{2}} \quad (\text{Gleichung 17})$$

$$y = y_1 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{1}{2}}\right) \quad (\text{Gleichung 18})$$

Der damit festgelegte Abnickpunkt liegt auf der Geraden, welche sich durch die Transformation der Winkelhalbierenden ergibt (siehe dazu Abbildung 30).

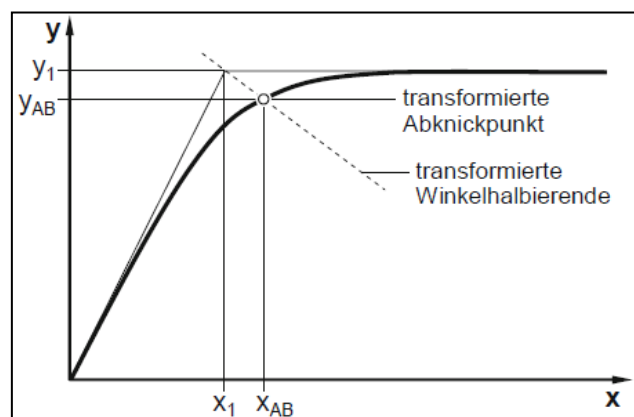


Abbildung 30: transformierende Winkelhalbierende<sup>315</sup>

<sup>315</sup> Nyhuis et al. (2012), S. 77.

Nyhuis und Wiendahl definieren (auf Grund von Simulationsstudien und Untersuchungen realer Abläufe) den Abknickpunkt auf einer realen Kennlinie als jenen Punkt, bei welchem die bestandsbedingten Leistungsverluste 6% betragen. Übertragen auf die  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion bedeutet dies, dass die Funktion die Winkelhalbierende bei  $y = -0,06$  schneidet. Davon ausgehend kann die Bestimmung des Wertes für  $C$  erfolgen (siehe dazu Gleichungen 19 und 20).

$$y_{AB} = -\frac{c}{\sqrt{2}} = -0,06 \quad (\text{Gleichung 19})$$

$$C = \frac{\ln\left(\frac{1}{2}\right)}{\ln(0,06)} \cong 0,25 \quad (\text{Gleichung 20})$$

Um den Streckfaktor  $\alpha_1$  bestimmen zu können, wird die Gleichung 17 nach  $\alpha_1$  aufgelöst:

$$\alpha_1 \cong \frac{\frac{x_{AB}}{x_1} - 1 + \frac{c}{\sqrt{2}}}{\frac{c}{\sqrt{2}}} \quad (\text{Gleichung 21})$$

Zur Lösung dieser Gleichung nehmen Nyhuis und Wiendahl für  $\frac{x_{AB}}{x_1} \cong 1,55$  an. Dies wird darin begründet, dass der wie oben definierte Abknickpunkt, d.h. das Verhältnis zwischen dem Bestandswert (bei 6% Auslastungsverluste) und dem idealen Mindestbestand, in durchgeführten Untersuchungen zumeist dann auftritt, wenn dieses etwa 1,55 beträgt. Setzt man diesen Wert in Gleichung 21 ein, so ergibt sich für  $\alpha_1 \cong 10$ .

Weiters verweisen die Autoren darauf, dass zur Bestimmung der Parameter  $C$  und  $\alpha_1$  auch ein anderer Abknickpunkt herangezogen werden kann, jedoch sich im Rahmen zahlreicher Untersuchungen gezeigt hat, dass sich die berechneten Leistungskennlinien nur geringfügig unterscheiden, wenn die Auslastungsverluste im Abknickpunkt im Wertebereich von  $\{3, \dots, 10\}$  liegen (siehe dazu Abbildung 31).

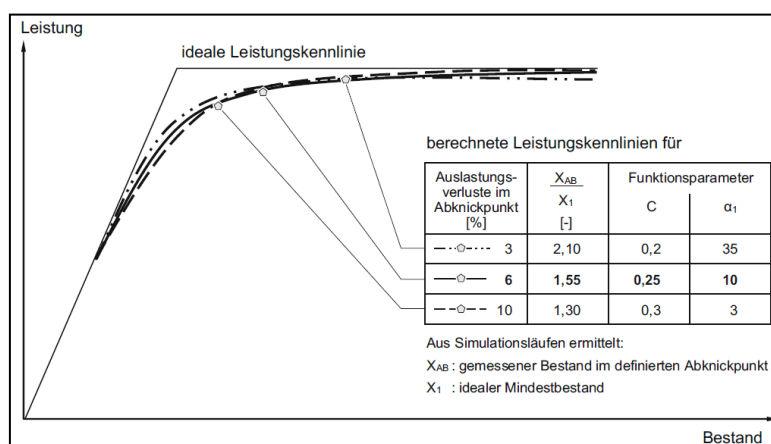


Abbildung 31: berechnete Kennlinien bei Variation der Funktionsparameter<sup>316</sup>

<sup>316</sup> Nyhuis et al. (2012), S. 80.

Abschließend ergibt sich zur Bestimmung des mittleren Bestandes  $B_m(t)$  und der mittleren Leistung  $L_m(t)$  durch die nachfolgend angeführten Ersetzungen in die Gleichungen 8 und 9:

$$B_m(t) = BI_{min} \cdot \left(1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4\right) + BI_{min} \cdot \alpha_1 \cdot t \quad (\text{Gleichung 22})$$

$$L_m(t) = L_{max} \cdot \left(1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4\right) \quad (\text{Gleichung 23})$$

wobei

$x(t) \rightarrow B_m(t)$  : mittlerer Bestand [h] als Funktion von  $t$

$y(t) \rightarrow L_m(t)$  : mittlere Leistung [h/BKT<sup>317</sup>] als Funktion von  $t$

$x_1 \rightarrow BI_{min}$  : idealer Mindestbestand [h]

$y_1 \rightarrow L_{max}$  : maximal mögliche Leistung [h/BKT]

$C \rightarrow \frac{1}{4}$  :  $C_{Norm}$ -Wert [-]

Durch das Verhältnis zwischen der berechneten Leistung  $L_m(t)$  zur maximal möglichen Leistung  $L_{max}$  kann auf die mittlere bestandsabhängige Auslastung  $A_m(t)$  geschlossen werden (siehe dazu Gleichung 24):

$$A_m(t) = \frac{L_m(t)}{L_{max}} \cdot 100 = \left(1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4\right) \cdot 100 \quad (\text{Gleichung 24})$$

wobei

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

$L_m(t)$  die mittlere Leistung [h/BKT]

$L_{max}$  die maximal mögliche Leistung [h/BKT]

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

Der Gleichungsanteil für den Bestand  $B_m(t)$  lässt sich in die zwei Bestandteile  $B_B(t)$ , welcher den mittleren Bestand bei Auftragsbearbeitung [h] angibt, und  $B_P(t)$ , den mittleren Pufferbestand [h] unterteilen (siehe dazu Gleichungen 25 bis 27):

$$B_m(t) = B_B(t) + B_P(t) \quad (\text{Gleichung 25})$$

$$B_B(t) = BI_{min} \cdot \left(1 - (1 - \sqrt[4]{t})^4\right) = \frac{BI_{min} \cdot A_m(t)}{100} \quad (\text{Gleichung 26})$$

$$B_P(t) = BI_{min} \cdot \alpha_1 \cdot t \quad (\text{Gleichung 27})$$

Nach dieser Beschreibung setzt sich der Bestand aus dem Anteil  $B_B(t)$ , welcher bei der Auftragsbearbeitung selbst anfällt und aus dem Anteil  $B_P(t)$ , welcher den Bestand der wartenden Aufträge repräsentiert, zusammen. Dabei kann der Anteil  $B_B(t)$  am Bestand maximal so

---

<sup>317</sup> BKT...Betriebskalendertage

groß sein wie der ideale Mindestbestand bzw. kommt es aufgrund von Materialflussabbrissen zu Auslastungsverlusten, so reduziert sich dieser Bestandsanteil dementsprechend proportional. Der zweite Bestandteil  $B_p(t)$  kann als Pufferbestand interpretiert werden, welcher auch durch  $BI_{min}$  bestimmt wird (siehe dazu Gleichung 27). Dies impliziert, dass der Pufferstand von der Auftragsgröße und der Streuung der Auftragszeiten abhängig ist. Die absolute Größe des Pufferbestandes wird durch den Streckfaktor  $\alpha_1$  bestimmt, welcher überproportional mit steigender Auslastung wächst.

Ebenso lässt sich der mittlere Bestand  $B_m$  unabhängig von der Laufvariablen  $t$  als Funktion von der Auslastung  $A_m$  bzw. der Leistung  $L_m$  beschreiben (siehe dazu Gleichungen 28 und 29).<sup>318</sup>

$$B_m(A_m) = BI_{min} \cdot \frac{A_m(t)}{100} + BI_{min} \cdot \alpha_1 \left( 1 - \sqrt[4]{1 - \frac{A_m}{100}} \right)^4 \quad (\text{Gleichung 28})$$

$$B_m(L_m) = BI_{min} \cdot \frac{L_m}{L_{max}} + BI_{min} \cdot \alpha_1 \left( 1 - \sqrt[4]{1 - \frac{L_m}{L_{max}}} \right)^4 \quad (\text{Gleichung 29})$$

Darauf aufbauend kann nun die Berechnung der Durchlaufzeit und die Bestimmung der relativen Terminabweichung erfolgen, welche neben dem Bestand und der Auslastung eines Produktionssystems die wesentlichen logistischen Zielgrößen in einer Produktion darstellen.

Die mittlere Durchlaufzeit ( $ZDL_m$ ), welche bei auftragszeitunabhängiger Reihenfolge gilt, ergibt sich aus:

$$ZDL_m(t) = R_m(t) - ZDF_m \cdot ZDF_v^2 \quad (\text{Gleichung 30})$$

wobei

$R_m$  mittlere Reichweite [BKT] (siehe u.a. Gleichung 5)

$ZDF_m$  mittlere Durchführungszeit [BKT]

$ZDF_v$  Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]

Dabei setzt sich die mittlere Durchführungszeit  $ZDF_m$  aus dem Verhältnis der Summe aller Einzeldurchführungszeiten durch die Anzahl der Aufträge (siehe Gleichung 31) zusammen.

$$ZDF_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZDF_i}{n} \quad (\text{Gleichung 31})$$

Der Variationskoeffizient der Durchführungszeit  $ZDF_v$ , welcher unter der Annahme, dass nur ein Arbeitssystem betrachtet und die maximal mögliche Leistung des Systems als konstant oder unabhängig von der Auftragszeit der einzelnen Arbeitsvorgänge angesehen werden, ist dem Variationskoeffizient der Auftragszeit  $ZAU_v$  gleichzusetzen (siehe Gleichung 32):

$$ZDF_v = ZAU_v \quad (\text{Gleichung 32})$$

<sup>318</sup> Wird durch die Auflösung der Gleichung 23 nach  $t$  erreicht.

Der Variationskoeffizient der Auftragszeit  $ZAU_v$ , welcher die Variabilität der Verteilung der Auftragszeiten an einem Arbeitssystem angibt, lässt sich aus dem Verhältnis der Standardabweichung<sup>319</sup> der Auftragszeiten  $ZAU_s$  (Gleichung 34) zum Mittelwert der Auftragszeiten  $ZAU_m$  (Gleichung 35) bestimmen (siehe dazu Gleichung 33).

$$ZAU_v = \frac{ZAU_s}{ZAU_m} \quad (\text{Gleichung 33})$$

wobei

$$ZAU_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ZAU_m - ZAU_i)^2}{n}} \quad (\text{Gleichung 34})$$

$$ZAU_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_i}{n} \quad (\text{Gleichung 35})$$

mit

$ZAU_m$  mittlere Auftragszeit [h]

$ZAU_i$  Auftragszeit je Arbeitsvorgang [h]

$n$  Anzahl der rückgemeldeten Arbeitsaufträge [-]

Die Auftragszeit  $ZAU$  in Stunden, welche für die Ausführung eines Arbeitsvorganges an einem Arbeitssystem vorgesehen ist, wird durch die Rüstzeit je Los, der Einzelzeit je Mengeneinheit und der Losgröße bestimmt (siehe dazu Gleichung 36):

$$ZAU = \frac{(x \cdot t_e + t_r)}{60} \quad (\text{Gleichung 36})$$

wobei

$x$  Losgröße [ME]

$t_r$  Rüstzeit je Los [min]

$t_e$  Einzelzeit (Vorgabezeit) je Mengeneinheit [min/ME]

Die Termintreue bzw. die relative Terminabweichung wiederum kann durch die Differenz der gemessenen Ist-Durchlaufzeit  $ZDL_{Ist}$  mit der vorgegeben Soll-Durchlaufzeit  $ZDL_{Soll}$  bestimmt werden.

Anschließend folgt nun die Entwicklung einer Basisgleichung zur Beschreibung berechneter Kennlinien, um die Frage beantworten zu können, ob durch die Wahl einer anderen zugrundeliegenden Funktion bzw. eines anderen Ansatzes eine bessere Annäherung berechneter Kennlinien (im Vergleich zu Nyhuis und Wiendahl) an reale Gegebenheiten erreicht werden kann.

---

<sup>319</sup> Die Standardabweichung beschreibt die Streubreite einer Verteilung.

### 3.3.3.1.1 Entwicklung einer Basisgleichung zur Darstellung berechneter Kennlinien

Da die gewählte  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion durch eine andere beliebige Funktion ersetzt werden kann, wurde zunächst nach anderen Basisfunktionen gesucht mit Hilfe derer ebenso die Darstellung berechneter Kennlinien erfolgen kann bzw. wurde in weiterer Folge nach einem Ansatz gesucht, mit welchem eine einfachere Beschreibung der logistischen Zielgrößen eines Produktionssystems möglich ist.

Zwei Ansätze konnten dazu identifiziert werden, welche im Nachfolgenden erläutert werden:

*Kennlinienansatz auf Basis von Bezier-Kurven:*<sup>320</sup>

Da die berechneten Kennlinien eine Approximation an den idealen Kennlinienverlauf darstellen, wurde zunächst nach einem Kurvenverlauf gesucht, bei welchem die erzeugte Kurve nicht durch bestimmte Punkte definiert wird, sondern über so genannte Stützpunkte gesteuert werden kann. Anschaulich kann man sich die dabei erzeugten Kurven als Linien vorstellen, die von den erzeugten Stützpunkten wie durch Gummibänder angezogen werden, d.h. je weiter abseits ein Punkt liegt, desto mehr wird sich der Gummi spannen und der Punkt wird einen größeren Abstand zum Ergebnis haben als andere. Diese so genannten Bezier-Kurven gehen auf den französischen Mathematiker Bezier zurück, welche bei der Automobilfirma Renault für das Karosseriedesign entwickelt wurden.

Eine Bezier-Kurve  $B(t)$  (siehe dazu Gleichung 37), welche mittels eines Parameters  $t$  erzeugt wird, ist definiert durch

$$B(t) = \sum_{i=0}^n p_i \cdot B_{i,n}(t) \quad t \in [0,1] \quad (\text{Gleichung 37})$$

wobei

$$B_{i,n}(t) = \binom{n}{i} \cdot t^i \cdot (1-t)^{n-i} \quad (\text{Gleichung 38})$$

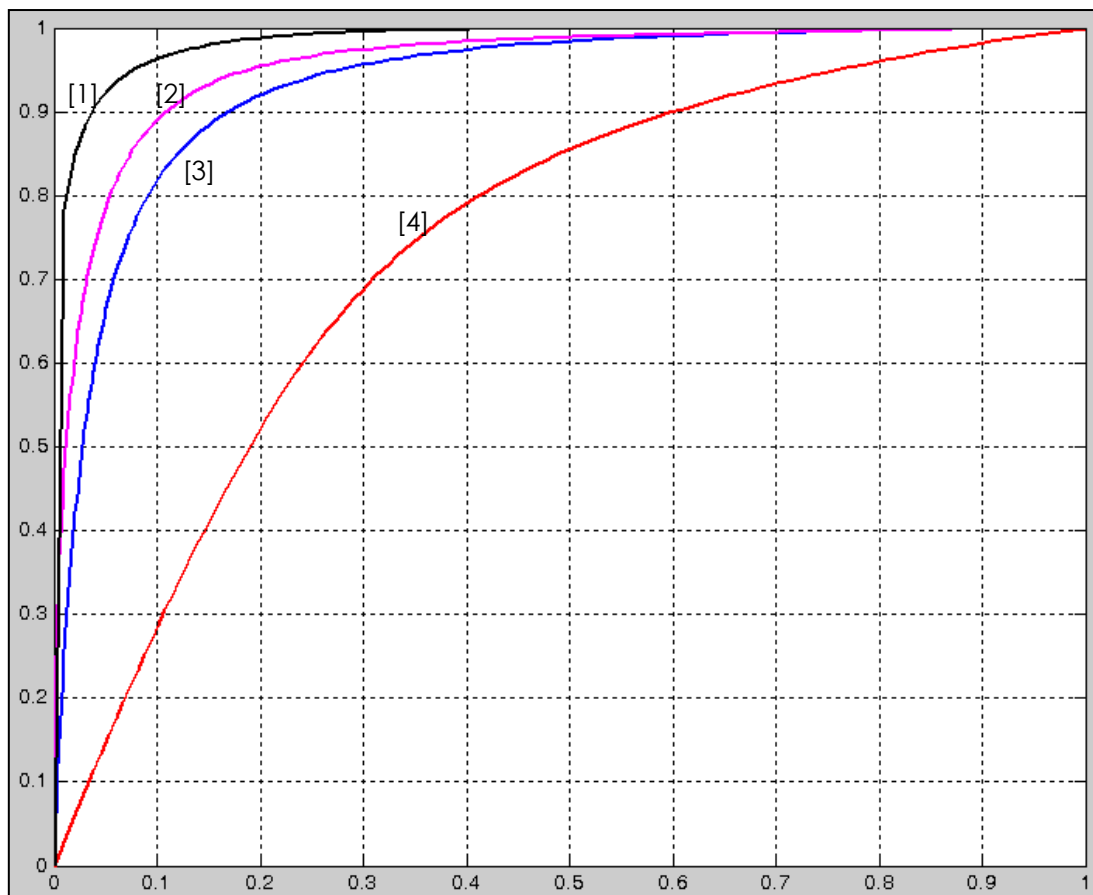
Ein Vorteil der Bezier-Kurve ist die parametrische Darstellung und die damit verbundene Verwendbarkeit für jede beliebige ebene Kurve. Jedem  $t \in [0,1]$  entspricht ein Punkt der Kurve. Die  $p_i$  sind die Vektoren zu den  $n+1$  Stützpunkten  $P_i$ , also  $p_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$ .  $B(t)$  ist dabei die gewichtete Summe aller Stützpunkt-Vektoren, wobei die einzelnen Gewichtungsfunktionen  $B_{i,n}(t)$  (Gleichung 38) neben dem Parameter  $t$  auch von  $n$  und  $i$  (bilden ein Stützpunktpaar) abhängen. Jeder Punkt hat somit seine eigenen Gewichte und für jeden Stützpunkt werden dabei andere Gewichte verwendet. Somit lassen sich für jedes Paar  $(i, n)$  diese Gewichtsfunktionen  $B_{i,n}(t)$  in Abhängigkeit von  $t$  darstellen.

<sup>320</sup> Vgl. Purgathofer (1985), S. 148 ff.



Aus der Definition von  $B_{i,n}(t)$  geht hervor, dass jeder Kurvenpunkt für  $t \in [0,1]$  von allen Stützpunkten  $P_i$  beeinflusst wird, die Kurve ist somit global definiert. Daraus folgt auch, wie bereits erwähnt, dass die Kurve nicht genau durch die definierten Punkte geht, sondern diese nur approximiert.

Für die Darstellung der berechneten Kennlinien wurde eine Bezier-Kurve, welche über fünf Stützpunkte im Intervall  $[0,1]$  definiert ist, gewählt. Dabei wurden zwei Punkte – der Anfangspunkt  $P_1$  und der Endpunkt  $P_5$  – fix festgelegt, welche die Koordinaten  $P_1 = (0,0)$  und  $P_5 = (1,1)$  aufweisen. Durch die weiteren drei Stützpunkte ( $P_2, P_3, P_4$ ) kann die Anpassung der Kurve erfolgen. Diese wurde mit Hilfe eines M-Files in Matlab programmiert (Code siehe Anhang B<sup>321</sup>). Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung 32 dargestellt.



**Abbildung 32: Bezier-Kurven als Basisgleichung für Kennlinien<sup>322</sup>**

Graph [1] stellt den Kennlinienverlauf mit der von Nyhuis und Wiendahl verwendeten  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion im Intervall  $[0,1]$  dar, die Graphen [2], [3] und [4] wurden mittels Bezier-Kurven erstellt und unterscheiden sich hinsichtlich der Werte für die Stützpunkte  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$ . Je nachdem wie diese gewählt sind, kann u.a. der Anstieg des Graphen variieren und die Anpassung der Kurve erfolgen. Ein Nachteil der Bezier-Kurven ist die Tatsache, dass um eine brauchbare Anpassung zu erhalten, eine Vielzahl an Stützpunkten benötigt wird, was wiederum zu einem

<sup>321</sup> Siehe dazu ausführlich Anhang B, S. 281 ff.

<sup>322</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

erheblichen Aufwand in der Berechnung und der Messdatenerhebung führt. Daher wurden im nächsten Schritt nach einer weiteren geeigneten Basisfunktion, welche eine höhere Praxis-tauglichkeit aufweist, gesucht.

*Kennlinienansatz auf Basis einer Sigmoid-Funktion:*

Als zweiter Ansatz für die Basisfunktion approximierter Kennlinien wurde eine sogenannte Sigmoid-Funktion verwendet, welche unter anderem auch als Ausgabefunktion bei Neuronalen Netzen Verwendung findet<sup>323</sup> und in der Literatur unter dem Begriff „Logistische Kurve“ bekannt ist<sup>324</sup> (siehe dazu Gleichung 39):<sup>325</sup>

$$a(t) = \min + \frac{(Max - \min)}{1 + e^{\frac{-\sigma \cdot t}{(Max - \min)}}} \quad (\text{Gleichung 39})$$

Die s-förmig verlaufende Kurve wurde zunächst im Bereich [0,1] untersucht (siehe dazu ausführlich M-File im Anhang B<sup>326</sup>). In Abbildung 33 sind dazu die verschiedenen Sigmoid-Funktion [b] bis [e], welche sich hinsichtlich ihrer Steigung (durch den Punkt  $P_2 = (x_2, y_2)$ ) wählbar unterscheiden, im Vergleich zur gewählten Funktion nach Nyhuis und Wiendahl (Kurve [a]), im Intervall [0,1] dargestellt.



Abbildung 33: Basisfunktionen im Vergleich<sup>327</sup>

<sup>323</sup> Vgl. Lange (2004), S. 17 ff.

<sup>324</sup> Vgl. Favre-Bulle (2004), S. 310 ff.

<sup>325</sup> Vgl. Gupta et al. (2002), S. 5.

<sup>326</sup> Siehe dazu ausführlich Anhang B, S. 281 ff.

<sup>327</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

In einem weiteren Schritt wurde die Kennlinie nach Nyhuis und Wiendahl mit jenen auf Basis der Sigmoid-Funktion im Intervall  $[0,10]$  (siehe dazu Abbildung 34 und M-File in Anhang B<sup>328</sup>) verglichen. Durch die Berechnung des Faktors  $\sigma$  der Sigmoid-Funktion kann ein Kurvenverlauf erzeugt werden, welcher ähnlich der von Nyhuis und Wiendahl entwickelten Funktion (siehe Abbildung 34, Kurve [1]) verläuft. Die auf Basis der Sigmoid-Funktion entwickelten Kennlinien (siehe dazu Abbildung 34, Kurve [2] und [3]) weisen gegenüber den Kennlinien der  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion den Vorteil auf, dass diesen eine exponentielle Funktion, welche „der Natur nachempfundene Verläufe“ generiert, zu Grunde liegt, über den gesamten Funktionsbereich stetig differenzierbar sind und durch die Wahl von  $\sigma$  (siehe dazu Gleichungen 41 und 43) eine beliebige Steigung annehmen können bzw. dadurch eine relativ einfache Anpassung an reale Gegebenheiten möglich ist. Der Aufwand der Datenerhebung zur Kurvenerstellung mittels Sigmoid-Funktion, d.h. die Bestimmung bzw. Schätzung des Ist-Bestandes  $B_{\text{Ist}}(t_{\text{Ist}})$  und der Ist-Leistung  $L_{\text{Ist}}(t_{\text{Ist}})$  zu einem gewählten Zeitpunkt  $t_{\text{Ist}}$  sowie des maximalen Bestands  $B_{\text{max}}(t)$  und der maximalen Leistung  $L_{\text{max}}(t)$ , welche meist im Unternehmen bekannt sind, und der daraus resultierende Nutzen der Visualisierung, stehen in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander, was für die Praxistauglichkeit dieses Ansatzes spricht. Ebenso ist zur Verwendung dieser Gleichung im Zuge der Kennlinienerstellung keine Parametrisierung notwendig.

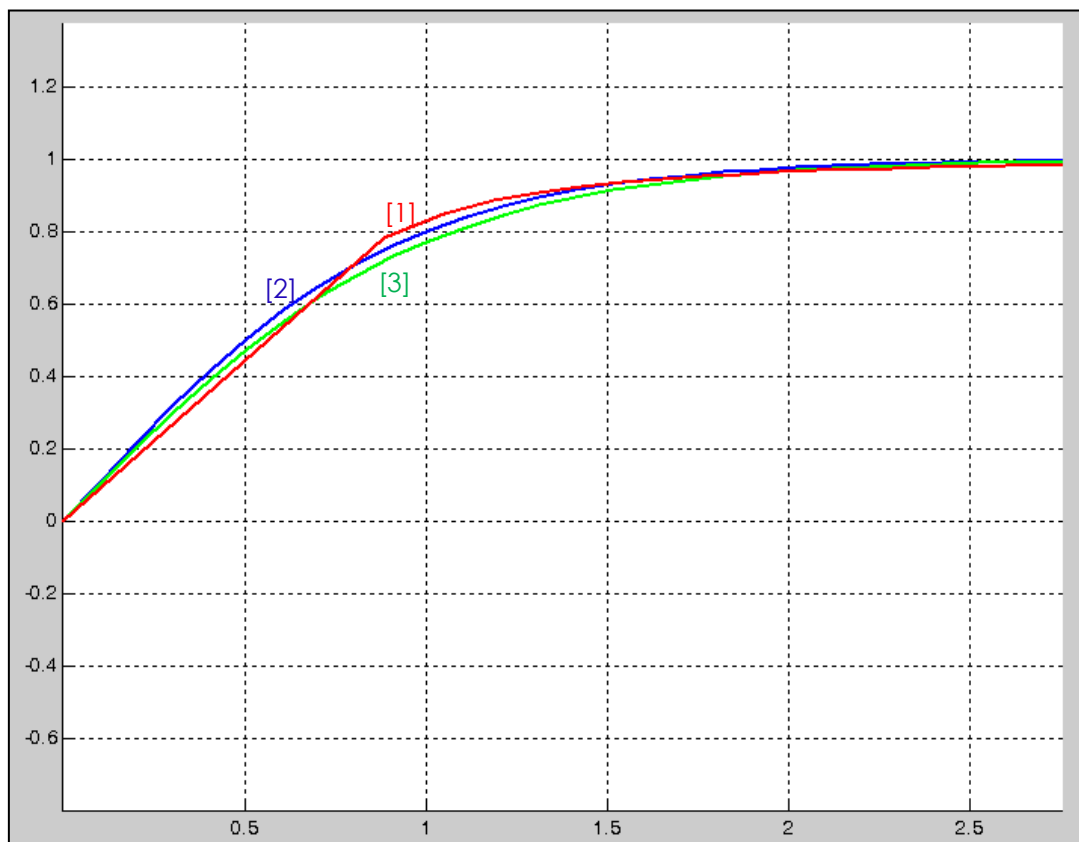


Abbildung 34: gestreckte Kennlinien im Vergleich<sup>329</sup>

<sup>328</sup> Siehe dazu ausführlich Anhang B, S. 281 ff.

<sup>329</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Somit ergeben sich durch Ersetzen der Variablen  $min$  und  $Max$  in Gleichung 39 mit  $min = -Max = L_{max}$  für die Leistungskennlinie und  $min = -Max = B_{max}$  für die Bestandskennlinie die mittlere Leistung  $L_m(t)$  und der mittlere Bestand  $B_m(t)$  (siehe dazu Gleichungen 40 und 42) wie folgt:

$$L_m(t) := -L_{max} + \frac{2 \cdot L_{max}}{1 + e^{\frac{-\sigma_L \cdot t}{2 \cdot L_{max}}}} \quad (\text{Gleichung 40})$$

wobei

$L_m(t)$  mittlere Leistung [t/h] des Arbeitssystems in Abhängigkeit von der Zeit  $t$

$L_{max}$  maximal mögliche Leistung des Arbeitssystems [t/h]

$t$  Zeit ( $t \geq 0$ )

$\sigma_L$  Leistungsfaktor [-]

$$\text{wobei } \sigma_L := -\ln\left(\frac{2 \cdot L_{max}}{L_{ist} + L_{max}} - 1\right) \cdot \frac{2 \cdot L_{max}}{t_{ist}} \quad (\text{Gleichung 41})$$

mit Messdaten Ist-Leistung  $L_{ist}$  zum Zeitpunkt  $t_{ist}$

und

$$B_m(t) := -B_{max} + \frac{2 \cdot B_{max}}{1 + e^{\frac{-\sigma_B \cdot t}{2 \cdot B_{max}}}} \quad (\text{Gleichung 42})$$

wobei

$B_m(t)$  mittlerer Bestand [t] im Arbeitssystem in Abhängigkeit von der Zeit  $t$

$B_{max}$  maximal möglicher Bestand im Arbeitssystem [t]

$t$  Zeit ( $t \geq 0$ )

$\sigma_B$  Bestandsfaktor [-]

$$\text{wobei } \sigma_B := -\ln\left(\frac{2 \cdot B_{max}}{B_{ist} + B_{max}} - 1\right) \cdot \frac{2 \cdot B_{max}}{t_{ist}} \quad (\text{Gleichung 43})$$

mit Messdaten Ist-Bestand  $B_{ist}$  zum Zeitpunkt  $t_{ist}$

Die Überprüfung, ob sich dieser Ansatz hinsichtlich der Beschreibung und Visualisierung der logistischen Zielgrößen am Beispiel eines hybriden Produktionssystems (im Vergleich zum Ansatz von Nyhuis und Wiendahl) besser eignet, erfolgt im Zuge des Fallbeispiels in Kapitel 5, Abschnitt 5.4.2.

### 3.3.3.2 Beurteilung der Anwendbarkeit von Produktionskennlinien in hybriden Produktionssystemen

Die Anwendbarkeit von Produktionskennlinien in der betrieblichen Praxis setzt wie bereits oben erwähnt, die Erstellung von idealen Kennlinien voraus. Um einen idealisierten Produktionsablauf beschreiben zu können, müssen alle dafür notwendigen Daten in hinreichender Genauigkeit vorhanden sein.<sup>330</sup>

Weiters handelt es sich bei der Kennlinientheorie um einen Ansatz, welcher von einem eingeschwungenen Betriebszustand ausgeht. Der Untersuchungszeitraum ist daher so zu wählen, dass die für diesen Bereich gültigen Kennzahlen repräsentativ für das gesamte Arbeitssystem übernommen werden können.<sup>331</sup> Diese Tatsache kann bei einem hybriden Produktionssystem, welches sich sowohl aus einer kontinuierlichen wie auch einer diskreten Fertigung zusammensetzt aufgrund der sich stark unterscheidenden Produktionseinflussparameter nicht vorausgesetzt werden. Um daher keine schwerwiegenden Einschränkungen in der Aussagekraft der zu erstellenden Kennlinien zu erhalten, bedarf es der getrennten Analyse und Betrachtung beider Fertigungsbereiche, aus welchen sich die Hybridfertigung zusammensetzt, was wiederum die Erstellung von Partialmodellen bedingt. Ebenso muss die Adaptierung bzw. Ergänzung der durch die Kennlinientheorie gegebenen Grundbeziehungen um jene Einflussfaktoren, welche in einer hybriden Produktion herrschen (siehe dazu Kapitel 4) erfolgen. Erst im Anschluss daran können die erhaltenen Kennlinien der untersuchten Teilbereiche in einem Totalmodell implementiert bzw. zusammengefasst werden. Weiters muss bei der Anwendung von Produktionskennlinien in hybriden Produktionssystemen berücksichtigt werden, dass die Auftragsstruktur über der Zeit Veränderungen unterliegt. Dies wiederum impliziert, dass einige Parameter zur Bestimmung der Kennlinien nur näherungsweise bestimmt werden können, was eine Verminderung der Aussagekraft der Produktionskennlinien zur Folge hat.<sup>332</sup> Auch muss der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die Anlagenauslastung, neben den durch einen zu geringen Vorrat an Arbeitsaufträgen bedingten Leerzeiten auch von weiteren Parametern wie Verlusten durch Ausfälle (hervorgerufen durch Störungen oder aufgrund notwendiger Rüst- und Einstellvorgänge), Geschwindigkeitsverlusten aufgrund von Leerläufen, Kurzstillständen und/oder verringerten Bearbeitungsgeschwindigkeiten sowie aufgrund von Verlusten durch Fehler, hervorgerufen durch Störungen im Prozessablauf oder Anlaufverlusten, beeinflusst wird.<sup>333</sup> <sup>334</sup> Eine alleinige Betrachtung der Leistungsfähigkeit des Produktionssystems in Abhängigkeit von den Beständen ist dahingehend zu wenig ausreichend. Da ein hybrides Produktionssystem aus mindestens zwei verschiedenen (kontinuierlichen und diskreten) Arbeitssystem-

---

<sup>330</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 203.

<sup>331</sup> Vgl. Nyhuis et al. (2006), S. 115 ff.

<sup>332</sup> Vgl. Nyhuis et al. (2006), S. 115 ff.

<sup>333</sup> Vgl. Al-Radhi et al. (1995), S. 24 ff.

<sup>334</sup> Zur ausführlichen Berechnung der Overall Equipment Effectiveness siehe Nakajima (1995), S. 43.

men besteht, weisen diese auch Unterschiede bzw. Schwankungen in der Belastung des Systems auf. Eines der beiden Arbeitssysteme stellt in der Regel den Produktionsengpass dar und daher ist es in der Praxis unmöglich beide Aggregate vollständig auszulasten, auch wenn ein Unternehmen an der Kapazitätsgrenze arbeitet.<sup>335</sup> Ist die maximale Auslastung des Engpassaggregats erreicht, können keine zusätzlichen Aufträge mehr in die Produktion eingelastet werden, außer man bedient sich eines Zwischenpuffers. Das Engpassaggregat bestimmt somit die Leistung des hybriden Produktionssystems bzw. die Notwendigkeit an Zwischenpuffern und so mitunter die Höhe der Fertigungsbestände.

Ein wesentlicher Aspekt, welcher in den Produktionskennlinien nicht abgebildet wird, jedoch auch bei hybriden Produktionssystemen Beachtung finden muss, sind die auf den technologischen Herstellungsverfahren beruhenden reihenfolgeabhängigen Rüst-, Einstell- und Umstellzeiten und den damit verbundenen Restriktionen aus der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung, auf welche im Abschnitt 3.4 eingegangen wird. Damit ergibt sich, dass die Anwendung von Produktionskennlinien zur Beschreibung von Produktionssystemen mit Hybridfertigung und den darin herrschenden Wechselwirkungen und Beziehungen nur dann gerechtfertigt ist, wenn diese um die Betrachtung des Einflusses der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung erweitert werden. Darauf aufbauend erfolgt nun die Erläuterung der wissenschaftstheoretischen Ansätze zur Losgrößen- und Reihenfolgemedellierung.

### 3.4 Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

Das folgende Unterkapitel hat vorrangig die Diskussion bestehender Modelle und Verfahren zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit in der betrieblichen Praxis (mit Fokussierung auf die Einsetzbarkeit in einem hybriden Produktionssystem) zum Inhalt. Nach einer kurzen Einführung in die Grundlagen der Losgrößen- und Reihenfolgemedellierung erfolgt die Abgrenzung der für diese Arbeit relevanten Modelle. Im Anschluss daran werden ausgewählte Modelle vorgestellt und es wird eine Übersicht über die algorithmischen Lösungsverfahren dieser Modelle gegeben. Den Schluss des Abschnittes 3.4 bildet die Beurteilung der bestehenden Ansätze im Hinblick auf deren Anwendbarkeit in der betrieblichen Praxis.

#### 3.4.1 Einführung in die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

„Unter einer (Produktions-) Losgröße versteht man eine Anzahl gleichartiger Objekte, die auf einem Arbeitsträger (Maschine) unmittelbar nacheinander ohne Rüstvorgänge zu fertigen sind [...]“<sup>336</sup> Die Produktionslosgröße bezeichnet damit jene „Menge einer Produktart oder

---

<sup>335</sup> Vgl. Lödding (2008), S. 37.

<sup>336</sup> Domschke et al. (1993), S. 15.

einer Baugruppe, die in einer Produktionsstufe als geschlossener Posten (Los) ohne Unterbrechung durch die Produktion anderer Produkte oder Baugruppen gefertigt wird.“<sup>337</sup>

Aufgabe der Produktionslosgrößenplanung, welche in der Literatur oftmals in direktem Zusammenhang mit der Reihenfolgeplanung beschrieben wird, ist die Festlegung der Anzahl an Objekten und in weiterer Folge die Bestimmung des Zeitpunktes zu welchem diese gefertigt werden sollen.<sup>338</sup>

Viele Methoden und Verfahren der Losgrößenplanung in der Produktion lassen sich auch auf eine vergleichbare Frage in der Bestellmengenplanung anwenden:<sup>339</sup> Wie viele gleichartige Objekte sollen in einer Bestellung bzw. in einer Lieferung zusammengefasst werden? Dies hat zur Folge, dass die Begriffe Losgröße und Bestellmenge oftmals synonym gebraucht werden. Steven<sup>340</sup> unterscheidet in der Definition der Losgröße daher den Bestell- und Produktionsfall. „Als Los bezeichnet man die Menge eines Materials, die beim Fremdbezug gemeinsam bei einem Lieferanten bestellt wird (Bestellfall) oder bei Eigenfertigung auf einer Anlage ohne Stillstand oder Unterbrechung durch andere Produkte hergestellt wird (Produktionsfall).“<sup>341</sup> Gegenstand der Losgrößen- und Ressourceneinsatzplanung (oder Reihenfolgeplanung)<sup>342</sup> ist also die Planung, in welcher Weise die zur Produktion benötigten Verbrauchsfaktoren (Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe und Zwischenprodukte) bereitgestellt und vor allem wie schließlich die vorhandenen Ressourcen zur Erzeugung des geplanten Produktionsprogramms gebündelt eingesetzt werden sollen.<sup>343</sup> Die vorliegende Arbeit hat die Betrachtung der Produktionslosgröße zum Inhalt und bezieht sich daher auf die zu Beginn vorgestellte Definition.

Eine Zusammenfassung von Materialmengen zu einem Los ist immer dann erforderlich, wenn Prozesse auf aufeinander folgenden Wertschöpfungsstufen nicht perfekt aufeinander abgestimmt sind. Dies tritt dann auf, wenn die Abgangsrate der vorangegangenen Wertschöpfungsstufe und die Abfertigungsrate der nachfolgenden Wertschöpfungsstufe voneinander abweichen (siehe Abbildung 35). Daraus resultieren gleichzeitig die Entstehung von Stau- und Wartelagern sowie die Notwendigkeit der Lagerhaltung.

---

<sup>337</sup> Vgl. Wirtschaftslexikon Gabler (2011).

<sup>338</sup> Vgl. Schulte (2009), S. 12.

<sup>339</sup> Siehe zur Analogie der Losgrößenplanung in Beschaffung und Produktion François (2000), S. 34.

<sup>340</sup> Vgl. Steven (2007), S. 225 f.

<sup>341</sup> Steven (2007), S. 226.

<sup>342</sup> Zur Einordnung der Losgrößenplanung in die Produktionsplanung siehe Abschnitt 3.2.5 oder Rossi (2005), S. 18 ff.

<sup>343</sup> Vgl. Günther et al. (2005), S. 173.

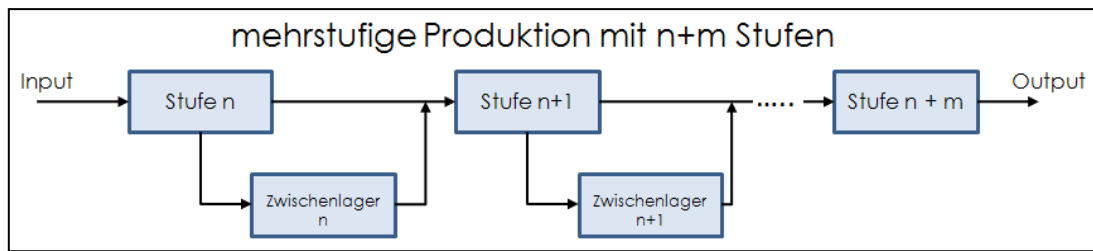


Abbildung 35: schematische Darstellung einer mehrstufigen Produktion<sup>344</sup>

Zur Planung der Losgröße sowohl in der Produktion als auch in der Beschaffung wurden so viele Verfahren entwickelt, wie in kaum einem anderen Bereich des Operations Research. Dies konnte auch in den Ergebnissen der durchgeführten Literaturrecherche bestätigt werden (siehe dazu Abschnitt 2.2.1).<sup>345</sup> Kurbel<sup>346</sup> bezeichnete diese Tatsache als „weitverästelte Flut an Losgrößenmodellen“. Die große Anzahl an unterschiedlichen Verfahren basiert im Wesentlichen auf der Existenz zahlreicher Verfeinerungen, Erweiterungen und Verbesserungsansätze der ersten Losgrößenmodelle, welche viele Aspekte der Realität nicht bzw. nur unzureichend berücksichtigen.<sup>347</sup> Ebenso liegt die steigende Anzahl an Verfahren zur Losgrößenplanung darin begründet, dass Optimallösungen teilweise aufgrund der früher unzureichenden Rechentechne mit keinem vertretbaren Aufwand zu ermitteln waren, weshalb für ein und das selbe Modell meist mehrere (heuristische) Verfahren entwickelt wurden, um eine bessere Annäherung an das Optimum zu erzielen.<sup>348</sup>

### 3.4.2 Modelle und Verfahren zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung in hybriden Produktionssystemen

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Klassifizierungen von Losgrößenmodellen, welche von einer sehr groben Einteilung bis hin zu einer detaillierten Unterteilung der Modelle reicht.

Die Losgrößenmodelle lassen sich u.a. nach der *Abbildung des Nachfrageprozesses*, der *Berücksichtigung der Kapazitätsgrenzen*, der *betrachteten Produktarten* und der *Anzahl der erfassten Produktionsstufen* klassifizieren:<sup>349 350</sup>

Von großer Bedeutung ist die *Abbildung des Nachfrageprozesses* im Hinblick auf die Variabilität und die Gewissheit. Bezüglich der Variabilität der Nachfrage unterscheidet man Modelle mit konstanter Nachfrage (statische Modelle) und Modelle, die im Zeitablauf schwankende Nachfrageprognosen abbilden (dynamische Modelle). Dies hat zur Folge, dass bei statischen Modellen ein unendlicher Planungshorizont und somit ein unbegrenzt fortlaufender Betriebsablauf angenommen wird. Darüber hinaus erfolgt die Annahme einer kontinu-

<sup>344</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>345</sup> Vgl. Kurbel (2005), S. 35.

<sup>346</sup> Kurbel (2005), S. 36.

<sup>347</sup> Vgl. Kurbel (2005), S. 35 f.

<sup>348</sup> Vgl. Domschke et al. (1997), S. 127 ff.

<sup>349</sup> Vgl. Steven (2007), S. 231 f.

<sup>350</sup> Vgl. Derstroff (1995), Domschke et al. (1997), Karimi et al. (2003) und Sürie (2005).



ierlichen Zeitachse, in welcher die Losauflage zu jedem beliebigen Zeitpunkt erfolgen kann.<sup>351</sup> In dynamischen Modellen wird in der Regel wie bereits erwähnt die Nachfrage als schwankend angesehen.<sup>352</sup> Bei diesen Modellen wird ein endlicher Planungshorizont, welcher in  $T$  diskrete Planungsperioden unterteilt werden kann, unterstellt. Die Losauflage ist daher nur zu diskreten Zeitpunkten möglich.<sup>353</sup>

In Bezug auf die Gewissheit der Nachfrage ergeben sich deterministische Modelle, die exakt eintreffende Nachfrageprognosen unterstellen oder stochastische Modelle, welche Unsicherheiten bei der Nachfrage sowie bei den Maschinenkapazitäten aufgrund von Anlagenausfällen berücksichtigen.<sup>354</sup> Deterministische Modelle nehmen diese Parameter als bekannt an und versuchen durch die Berücksichtigung von Sicherheitsbeständen oder Puffern dem stochastischen Einfluss entgegenzuwirken.<sup>355</sup>

Ein weiteres Kriterium ist die *Berücksichtigung der Kapazitätsgrenzen*, welche in der Produktion auftreten können. In unkapazitierten Losgrößenmodellen werden Kapazitätsgrenzen vernachlässigt, während diese in kapazitierten Modellen explizit erfasst werden. Dabei stellt die verfügbare Kapazität die Obergrenze für die maximale Nutzungszeit der Ressource dar. Normalerweise ist die verfügbare Kapazität fix vorgegeben, jedoch besteht die Möglichkeit diese gegebenenfalls beispielsweise durch den Einsatz von Überstunden zu erweitern.<sup>356</sup> Für die Herstellung von Produkten werden Nutzungszeiten an den Ressourcen berücksichtigt, welche die vorhandene Kapazität verringern. Dabei erfolgt die Differenzierung in Bearbeitungs- und Rüstzeiten. Als Bearbeitungszeit wird jene Zeitspanne verstanden, die für die Herstellung einer Mengeneinheit (ME) eines Produktes notwendig ist. Rüstzeiten entsprechen in der Regel jener Zeitspanne, welche für die Durchführung vorbereitender Maßnahmen zur Fertigung eines nachfolgenden Produktes notwendig sind. Diese Rüstvorgänge beinhalten beispielweise Werkzeugwechsel, Wartungs-, Reinigungs- und Justierprozesse.<sup>357</sup>

Nach der Anzahl der im Modell *betrachteten Produktarten* lassen sich Einproduktmodelle von Mehrproduktmodellen unterscheiden, welche die produktionstechnischen Interdependenzen zwischen mehreren Produkten beachten.<sup>358</sup>

Die Anzahl der *erfassten Produktionsstufen* führt zu einer Unterscheidung in einstufige und mehrstufige Modelle, welche zusätzlich die Produktionsstruktur und die daraus resultierenden Beziehungen zwischen den Losen auf den verschiedenen Produktionsstufen berücksichtigen. Eine einstufige Erzeugnisstruktur liegt vor, wenn zwischen Vorgänger- und Nachfolgerprodukten keine Abhängigkeiten existieren oder diese unberücksichtigt bleiben. Bei mehr-

---

<sup>351</sup> Vgl. Schneider et al. (2005), S. 49.

<sup>352</sup> Vgl. Corsten und Gössinger (2008), S. 227.

<sup>353</sup> Vgl. Stammen-Hegener (2002), S. 13.

<sup>354</sup> Vgl. Stammen-Hegener (2002), S. 13.

<sup>355</sup> Vgl. Derstoff (1995), S. 22.

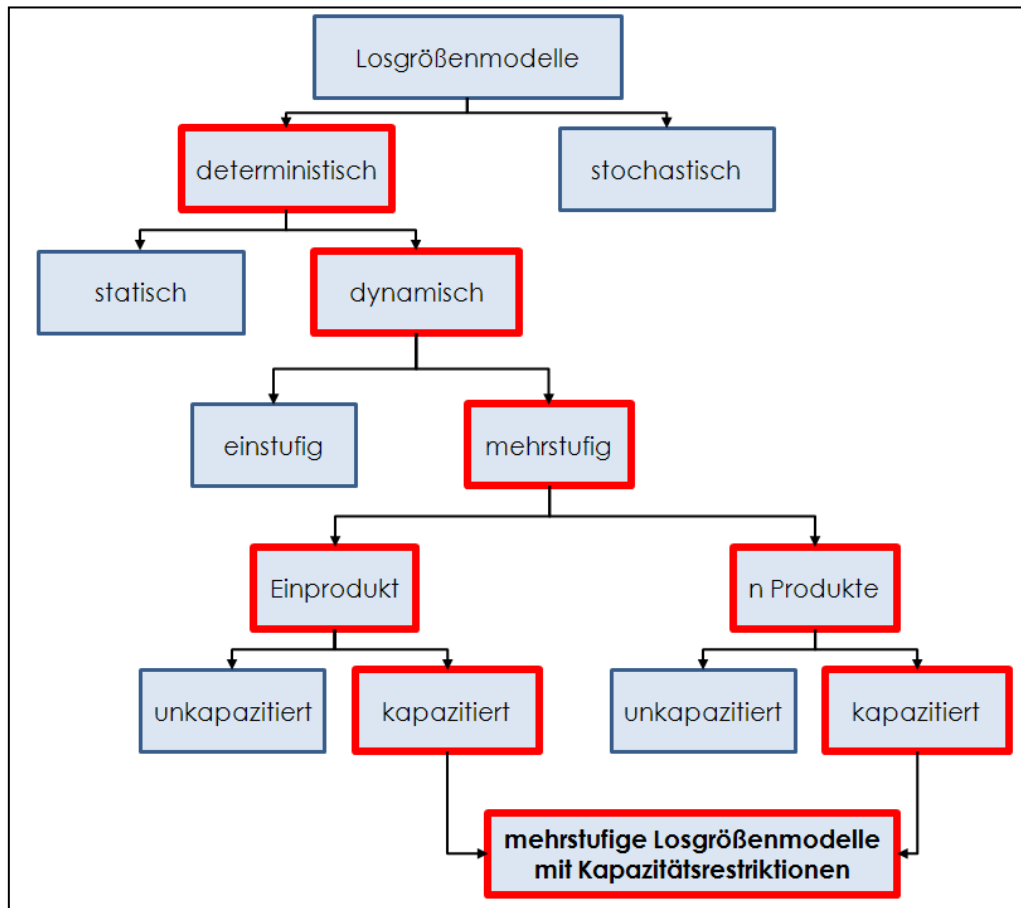
<sup>356</sup> Vgl. Kuik et al. (1993), S. 7.

<sup>357</sup> Vgl. Meyr (1999), S. 47.

<sup>358</sup> Vgl. Schneider et al. (2005), S. 49.

stufigen Erzeugnisstrukturen werden die Beziehungen zwischen Vorgänger und Nachfolger explizit berücksichtigt.<sup>359</sup>

Die nachfolgende Abbildung 36 gibt einen Überblick über die Modellklassen der Losgrößenplanung und zeigt zugleich die getroffene Abgrenzung der betrachteten Losgrößenmodelle im Zuge dieser Dissertation auf.



**Abbildung 36: Abgrenzung der für diese Arbeit relevanten Losgrößenmodelle<sup>360</sup>**

Fokussiert werden in dieser Arbeit die deterministischen, dynamischen Modelle der mehrstufigen Einprodukt- und Mehrprodukt-Losgrößenplanung bei Kapazitätsbeschränkungen. Die Abgrenzung der relevanten Losgrößenmodelle wurde aufgrund der im Folgenden angeführten Überlegungen getroffen:

Ausgehend von einer Vielzahl an Modellen zur Losgrößenplanung wurde zunächst die Abgrenzung hinsichtlich der Abbildung des Nachfrageprozesses vorgenommen. Wie bereits erwähnt, kann diesbezüglich die Einteilung in deterministische und stochastische Modelle getroffen werden. In der betrieblichen Realität sind die Daten, insbesondere die Nachfragedaten, in den meisten Fällen zwar nicht mit Sicherheit bekannt, jedoch liegen in einem Großteil der Unternehmen die zukünftigen Bedarfe basierend auf Schätzungen, Erfahrungen und

<sup>359</sup> Vgl. Meyr (1999), S. 47.

<sup>360</sup> In Anlehnung an Domschke et al. (1997), S. 74.

Nachfrageprognosen vor. In der Planungspraxis versucht man die Unsicherheit bezüglich der Nachfrage durch die Korrektur des verfügbaren Lagerbestands um einen sogenannten Sicherheitsbestand bei der Nettobedarfsrechnung zu berücksichtigen und dann die Losgröße mit einem Losgrößenmodell für den deterministischen Bedarf zu ermitteln. Aufgrund der durch die Charakterisierung eines hybriden Produktionssystems ermittelten notwendigen Fokussierung auf reihenfolgeabhängige Rüstzeiten und der Identifizierung eines starken Sicherheitsdenkens aufgrund des Einsatzes kapitalintensiver Aggregate, sowie der daraus resultierenden Fokussierung auf eine möglichst hohe Anlagenauslastung und den dadurch bedingten Sicherheitsbeständen, wie auch der Tatsache, dass Just-in-Time bzw. Lean-Konzepte nur bedingt anwendbar<sup>361</sup> sind, wurden die Verfahren der stochastischen Losgrößenbestimmung (wie beispielsweise das Bestellrhythmus-, Bestellmengen- und Bestellpunktverfahren) zwar beleuchtet, jedoch stehen die in der Literatur vorhandenen stochastischen Ansätze u.a. aufgrund ihrer Fokussierung auf minimale Sicherheitsbestände in Konflikt mit den in hybriden Produktionssystemen herrschenden Produktionsbedingungen und den daraus resultierenden Unternehmensstrategien. Tatsache ist, dass in der betrieblichen Praxis in hybriden Produktionssystemen höhere Bestände zugunsten einer möglichst hohen Anlagenauslastung in Kauf genommen werden.<sup>362</sup> Ebenso greift man in der Regel auf Prognosen der Periodennachfragemengen zurück, weshalb die deterministischen Modelle der Losgrößenplanung in dieser Arbeit fokussiert werden.<sup>363</sup> Deterministische Modelle lassen sich wiederum in statistische und dynamische Modelle unterscheiden: Statistische Modelle weisen eine konstante Nachfrage auf, während bei dynamischen Modellen die Nachfrage über die Zeit variiert. Hierbei erfolgt die Abgrenzung der Betrachtung auf die dynamischen Modelle der deterministischen Losgrößenplanung, da in der betrieblichen Praxis nicht von einer konstanten Nachfrage über die Zeit ausgegangen werden kann. Eine weitere Unterteilung kann bezüglich der Anzahl zu produzierender Produkte getroffen werden, wobei hier sowohl Einprodukt- als auch Mehrprodukt-Modelle im Fokus der Betrachtung stehen. Einstufige Modelle unterscheiden sich dahingehend zu mehrstufigen Modellen, dass bei diesen die Herstellung der Vorprodukte keine Berücksichtigung findet. Da aber die Bewertung der bestehenden Ansätze der Losgrößenmodellierung im Hinblick auf ein hybrides Produktionssystem erfolgt, welches in der Regel eine mehrstufige Produktion (mindestens eine 2-stufige Produktion) aufweist, erfolgt die Abgrenzung hinsichtlich der mehrstufigen Modelle der Losgrößenplanung. Ebenso müssen Kapazitätsrestriktionen, welche einen wesentlichen Einflussfaktor in der Produktionsplanung und -steuerung darstellen, Berücksichtigung finden. Fokussiert werden daher jene Modellansätze, welche die kapazitiven Grenzen von Anlagen beachten.

---

<sup>361</sup> Vgl. Volland (2011), S. 20.

<sup>362</sup> Vgl. Volland (2011), S. 20.

<sup>363</sup> Siehe umfassend zu stochastischen Verfahren Domschke et al. (1997), S. 166 ff.

Somit ergibt sich für diese Arbeit die Abgrenzung und Fokussierung jener Losgrößenplanungsverfahren, welche den deterministischen, dynamischen Einprodukt- oder Mehrprodukt-Modellen über mehrere Produktionsstufen mit Berücksichtigung der Anlagenkapazitäten zuzuordnen sind.

Darauf aufbauend folgt nun die Vorstellung und Diskussion der wesentlichen Basismodelle der mehrstufigen Losgrößenplanung mit Kapazitätsbeschränkungen. Im Nachfolgenden stehen dabei weniger die mathematischen Berechnungen der Losgrößenmodelle im Vordergrund, vielmehr wird der Fokus auf die dahinterliegenden Annahmen und den dabei berücksichtigten Aspekten gelegt. Dies ist notwendig, um eine Beurteilung der betrachtenden Verfahren hinsichtlich ihrer Schwachstellen, Restriktionen und ihrer Berücksichtigung von logistischen Zielindikatoren vornehmen zu können.

### 3.4.2.1 Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsrestriktionen

Das statische Losgrößenproblem (EPQ) bei konstanter Nachfrage wurde bereits 1913 von Harris formuliert.<sup>364</sup> Die erste dynamische Modellformulierung geht auf Wagner und Whitin aus dem Jahre 1958 zurück.<sup>365</sup> Dieses einstufige Losgrößenproblem ohne Kapazitätsrestriktionen bildet die Grundlage für zahlreiche Modellformulierungen. Erweiterungen des einstufigen Losgrößenproblems ohne Kapazitätsrestriktionen (in der Literatur auch als Single-Level Uncapacitated Lotsizing Problem (SLULSP) oder als Wagner-Within-Problem bezeichnet) stellen das Single-Level Capacitated Lotsizing Problem (CLSP) bzw. das Discrete Lotsizing and Scheduling Problem (DLSP), welche Kapazitäts- bzw. Reihenfolgerestriktionen berücksichtigen, dar.<sup>366</sup> Auf das CLSP aufbauend wurde das Proportional Lotsizing Problem (PLSP) entwickelt, welches das Fertigen von zwei Produktionstypen pro Periode erlaubt (vor und nach dem Umstellen des Rüstzustandes).<sup>367</sup>

In Tabelle 13 sind nochmals die gerade genannten einstufigen dynamischen Losgrößenplanungsverfahren<sup>368</sup> und die dabei berücksichtigenden Faktoren zusammengefasst:

---

<sup>364</sup> Vgl. Harris (1913); in der Literatur auch als Andler'sche Losgrößenformel oder EPQ (Economic Production Quantity)-Modell bekannt.

<sup>365</sup> Das SLULSP wurde von Wagner und Whitin eingeführt und stellt das „Urmodell“ der dynamischen Losgrößenplanung dar.

<sup>366</sup> Vgl. Karmarkar und Schrage (1985); Tempelmeier (2008a), S. 138 f.

<sup>367</sup> Vgl. Sürle (2005), S. 18.

<sup>368</sup> Eine detaillierte Betrachtung erfolgt in Anhang C, S. 287 ff.

Tabelle 13: Überblick - einstufige dynamische Losgrößenverfahren<sup>369</sup>

|                           | Produktionskosten | Rüstkosten | Lagerhaltungskosten | Terminierter Horizont | Ein-/Mehrprodukt<br>(E...Einprodukt/ M...Mehrprodukt) | Rüstkzustandsübertragung | Produktionskapazität | Rüstzeiten |
|---------------------------|-------------------|------------|---------------------|-----------------------|---|--------------------------|----------------------|------------|
| SLULSP<br>(Wagner-Whitin) | X                 | X          | X                   | X                     | E   |                          |                      |            |
| CLSP                      | X                 | X          | X                   | X                     | M   |                          | X                    | X          |
| PLSP                      |                   | X          | X                   | X                     | M   | X                        | X                    |            |
| DLSP                      |                   | X          | X                   | X                     | M   |                          | X                    |            |

Die im Nachfolgenden vorgestellten Losgrößenmodelle basieren auf diesen Modellformulierungen.<sup>370</sup>

Die Modelle der mehrstufigen Losgrößenplanung mit Kapazitätsrestriktionen (Überblicksdarstellung siehe Abbildung 37) lassen sich wiederum nach mehreren Gesichtspunkten klassifizieren, auf welche nun, bevor die Diskussion und Begutachtung ausgewählter Modelle erfolgt, eingegangen wird:

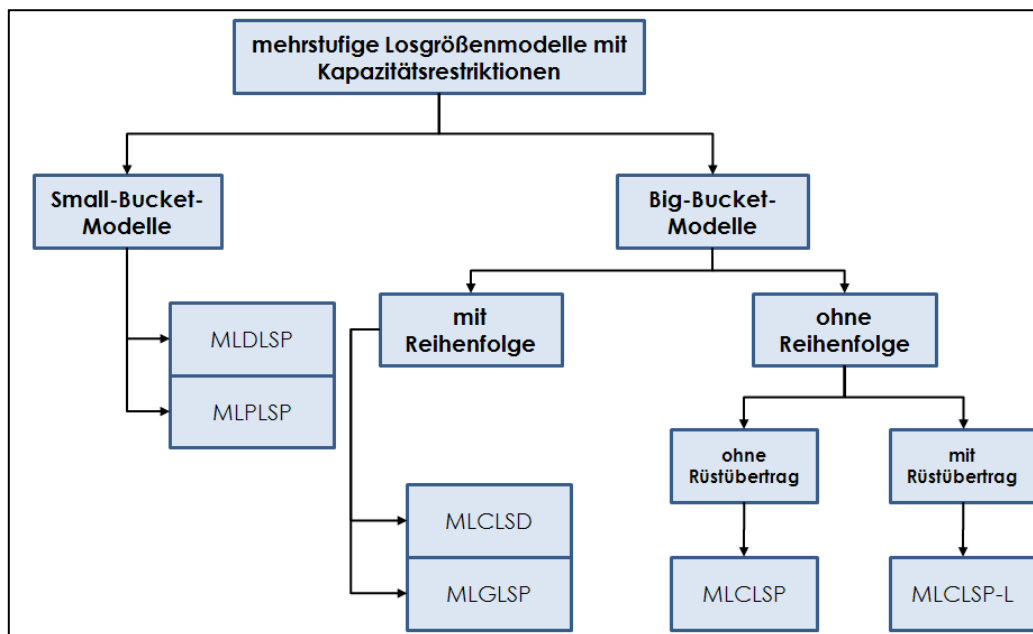


Abbildung 37: mehrstufige Losgrößenmodelle mit Kapazitätsrestriktionen<sup>371</sup>

<sup>369</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>370</sup> Vgl. Buschkühl et al. (2010), S. 231 ff.

Bei den mehrstufigen Losgrößenmodellen mit Kapazitätsrestriktionen mit einem endlichen Planungshorizont kann u.a. zwischen so genannten *Small-Bucket-* und *Big-Bucket-Modellen* unterschieden werden.<sup>372</sup>

Die zentrale Annahme bei *Small-Bucket-Modellen* besteht darin, dass der Rüstzustand einer Maschine oder Anlage in jedem Zeitabschnitt höchstens einmal verändert werden kann. Damit können auf einer Anlage je Zeitabschnitt höchstens zwei unterschiedliche Produkte hergestellt werden - eines vor, eines nach der Umrüstung. Schreibt die Herstellung eines Produktes nicht zwingend die Umrüstung der Anlage noch im selben Zeitabschnitt hervor, müssen die Rüstzustände der Maschine über die Zeitabschnittsgrenzen hinweg abgebildet werden können.<sup>373</sup> Aufgrund dieser Einschränkung wird eine relativ kurze Periodenzeit unterstellt.<sup>374</sup>

Bei einem *Big-Bucket-Modell* geht man von der Annahme aus, dass für jedes in einem Zeitabschnitt gefertigte Produkt auch genau ein Rüstvorgang in diesem Zeitabschnitt für die entsprechende Anlage erforderlich ist und der tatsächliche Rüstzustand eines Betriebsmittels nicht über den Zeitabschnitt hinweg abgebildet wird. Bei diesen Modellen ist also die Anzahl der zu fertigenden Produktarten innerhalb einer Periode nur durch die Produktanzahl beschränkt.<sup>375</sup> Diese Eigenschaft der *Big-Bucket-Modelle* ist nur dann nicht mit einem erheblichen Abbildungsfehler verbunden, wenn auf den einzelnen Anlagen in einem Zeitabschnitt regelmäßig mehrere verschiedene Produkte hergestellt werden.<sup>376</sup>

Bei *Big-Bucket-Modellen* kann eine weitere Einteilung hinsichtlich der *Berücksichtigung der Auftragsreihenfolge* getroffen werden. Aufgrund der Komplexität wird bei Losgrößenmodellen häufig auf eine simultane Maschinenbelegungsplanung verzichtet. Bei *Small-Bucket-Modellen* wird die Produktionsreihenfolge durch die Modellierung der Zeit modellintern bestimmt, da in jeder Periode maximal für eine Produktart gerüstet werden kann.<sup>377</sup> Bei *Big-Bucket-Modellen* wird die Reihenfolge oftmals erst in einem nachfolgenden Planungsschritt bestimmt. Für den Fall, dass reihenfolgeabhängige Rüstvorgänge auftreten, wird die Losgrößen- und Maschinenbelegungsplanung simultan durchgeführt.<sup>378</sup> Ist dies der Fall, werden die Rüstzeiten und -kosten in Abhängigkeit des zuvor gefertigten Produktes bestimmt.

Darüber hinaus kann bei *Big-Bucket-Modellen* die Differenzierung bezgl. der Möglichkeit der *Rüstübertragung* erfolgen. Einige Modellformulierungen schließen den Erhalt eines Rüstzustands auf einer Maschine über Periodengrenzen hinweg aus. Ist dies der Fall, dann kehrt die Maschine nach Ablauf der Periode wieder in den Nullstand zurück. Somit ist zu Beginn der nachfolgenden Periode ein erneuter Rüstvorgang notwendig, auch wenn das Pro-

---

<sup>371</sup> In Anlehnung an Stammen-Hegener (2002), S. 21.

<sup>372</sup> Vgl. Tempelmeier (2008a), S. 182 f.; Karimi et al. (2003), S. 366.

<sup>373</sup> Vgl. Dangelmaier (2009), S. 603.

<sup>374</sup> Vgl. Eppen et al. (1987), S. 832; Meyr (1999), S. 52.

<sup>375</sup> Vgl. Eppen et al. (1987), S. 832; Meyr (1999), S. 52.

<sup>376</sup> Vgl. Dangelmaier (2009), S. 603.

<sup>377</sup> Vgl. Tempelmeier (2008a), S. 182 ff.

<sup>378</sup> Vgl. Quadt et al. (2008), S. 62.

dukt in zwei aufeinander folgenden Perioden hergestellt wird.<sup>379</sup> Andere Modellformulierungen ermöglichen die Übertragung des Rüstzustandes auf einer Maschine über die Periodengrenzen hinaus. Somit kann die Fertigung eines Produktes ohne erneuten Rüstvorgang in der nachfolgenden Periode fortgesetzt werden.<sup>380</sup> In diesem Fall kann zwischen einfachen und mehrfachen Rüstübertrag unterschieden werden: Mittels einfacher Rüstübertragung ist es möglich, den Rüstzustand auf einer Maschine für ein Produkt bis zum Beginn einer nachfolgenden Periode aufrecht zu erhalten.<sup>381</sup> Wird der Rüstzustand in eine nachfolgende Periode übertragen und es erfolgt kein weiterer Rüstvorgang für ein anderes Produkt, dann geht der übertragene Rüstzustand am Ende der Periode verloren.<sup>382</sup> Wird zwischenzeitlich nicht auf ein anderes Produkt umgerüstet, dann kann der Rüstzustand für ein Produkt bei mehrfacher Rüstübertragung über mehrere Perioden erhalten bleiben.<sup>383</sup>

Zu den Small-Bucket-Modellen gehören im mehrstufigen Fall das *Multi-Level Proportional Lotsizing Problem (MLPLSP)*<sup>384</sup> sowie das *Multi-Level Discrete Lotsizing and Scheduling Problem (MLDLSP)*.<sup>385</sup> Bei beiden Modellen besteht die Möglichkeit der Rüstübertragung.

Bei den Big-Bucket-Modellen wird zwischen Modellen mit bzw. ohne integrierte Reihenfolgeplanung unterschieden. Bei den *mehrstufigen Problemen mit Reihenfolgeplanung* stellt das *Multi-Level General Lotsizing and Scheduling Problem (MLGLSP)*<sup>386</sup> einen Sonderfall dar, da hierbei Makroperioden betrachtet werden, die jedoch intern in Mikroebenen aufgeteilt werden. Als reines Big-Bucket-Modell mit Reihenfolgeplanung kann das *mehrstufige Losgrößenproblem mit Kapazitätsrestriktionen und reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten* - das *Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Sequence Dependent Setup Costs (MLCLSD)*<sup>387</sup> - bezeichnet werden. In diesem Modell werden reihenfolgeabhängige Rüstzeiten berücksichtigt. Der Erhalt des Rüstzustandes ist sowohl im MLGLSP als auch im MLCLSD integriert.

Bei den *mehrstufigen Losgrößenproblemen mit Kapazitätsrestriktionen (MLCLSP)*<sup>388</sup> geht der Rüstzustand am Ende einer Periode verloren. Die Möglichkeit der Rüstübertragung wird beim *mehrstufigen Losgrößenproblem mit Kapazitätsrestriktionen und Erhalt des Rüstzustandes* - *Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Linked Lotsizes (MLCLSP-L)*<sup>389</sup> - berücksichtigt.

Small-Bucket-Modelle werden vorwiegend im Bereich der Mehrprodukt-Fließproduktion verwendet. Aufgrund der modellinternen Bestimmung der Reihenfolge bewirken unvorhergesehene Änderungen im Produktionsablauf in den meisten Fällen eine Neuplanung.<sup>390</sup> Big-Bucket-Modelle ermitteln nur die Produktionsmengen einzelner Perioden und erst in einem anschließenden Planungsschritt wird die Bearbeitungsreihenfolge der Produktionsaufträge auf

<sup>379</sup> Vgl. Meyr (1999), S. 48.

<sup>380</sup> Vgl. Karimi et al. (2003), S. 367.

<sup>381</sup> Vgl. Quadt et al. (2008), S. 62.

<sup>382</sup> Vgl. Haase (1998), S. 130 f.; Tempelmeier et al. (2009), S. 387 f.

<sup>383</sup> Vgl. Sürie et al. (2003), S. 1040 ff.

<sup>384</sup> Nach Kimms (1996 a, 1997).

<sup>385</sup> Nach Kimms (1996 b).

<sup>386</sup> Nach Stammen-Hegener (2002).

<sup>387</sup> Nach Haase (1996); Vgl. auch Grünert (1998).

<sup>388</sup> Nach Billington et al. (1983).

<sup>389</sup> Nach Stadler und Sürie (2003).

<sup>390</sup> Vgl. Tempelmeier (2008a), S. 188.

den Maschinen bestimmt. Aufgrund dieser Tatsache ist die Reihenfolge der Produkte in einer Periode flexibel und die somit ermittelten Produktionspläne robuster gegenüber Veränderungen. In diesen Modellen ist es möglich, einen Teil der Produktionskapazität für spätere Planänderungen aufgrund von kurzfristigen Kundenaufträgen oder Maschinenausfällen zu reservieren.<sup>391</sup> Dies lässt den Schluss zu, dass die bestehenden Ansätze der Small-Bucket-Modelle weniger geeignet sind um die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung in einem hybriden Produktionssystem abbilden zu können.

Das *mehrstufiges Losgrößenproblem mit Kapazitätsrestriktionen (MLCLSP)* sowie das *mehrstufige Losgrößenproblem mit Kapazitätsrestriktionen und Erhalt des Rüstzustandes (MLCLSP-L)*, welche zu den Big-Bucket-Modellen zählen, eignen sich aufgrund der Tatsache, dass keine reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten berücksichtigt werden, jedoch in einem hybriden Produktionssystem der Fokus vor allem in den reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten liegt, kaum um eine realitätsnahe Abbildung des Systemverhaltens in hybriden Produktionssystemen erhalten zu können.

Somit stellt das *mehrstufige Losgrößenproblem mit Kapazitätsrestriktionen und reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten (MLCLSD)* den geeignetsten in der Literatur vorhandenen Modellierungsansatz zur Darstellung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung in einem hybriden Produktionssystem dar. Daher erfolgt nun im Anschluss die ausführliche Diskussion und Vorstellung dieses Modells.

#### **3.4.2.1.1 Mehrstufiges Losgrößenproblem mit beschränkten Kapazitäten und reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten und -kosten (MLCLSD)**

Das mehrstufige Losgrößenproblem mit beschränkten Kapazitäten und reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten und -kosten (MLCLSD)<sup>392</sup> ist eine Erweiterung der von Haase im Jahre 1996 eingeführten einstufigen Losgrößenproblems mit Kapazitätsrestriktionen und reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten (Capacitated Lotsizing Problem with Sequence Dependent Setup Costs-CLSD). Zusätzlich zu den vorhin erwähnten Modellen MLCLSP und MLCLSP-L werden hier reihenfolgeabhängige Rüstzeiten und -kosten unterstellt. Beim MLCLSD handelt es sich im Gegensatz zum MLCLSP-L nicht mehr um ein partielles Reihenfolgeproblem, bei dem jeweils nur das erste und letzte Produkt einer Periode auf jeder Maschine identifiziert werden. Vielmehr wird hier die vollständige Produktionsreihenfolge bestimmt und somit gleichzeitig auch ein zulässiger Maschinenbelegungsplan ermittelt. Bei der Modellierung des MLCLSD wird zur Bestimmung der Reihenfolge auf einen Teil der Modellformulierung des Handlungsreisendenproblems (Traveling Salesman Problem - TSP) zurückgegriffen.<sup>393</sup>

Für die Bestimmung der Rüstreihenfolge werden zunächst binäre Rüstvariablen  $\delta_{ikt}$  definiert:

<sup>391</sup> Vgl. Helber (1994), S. 166.

<sup>392</sup> Dieses Modell wird in der Literatur auch als Multi-Level Sequence Dependent Lotsizing and Scheduling Problem (MSLS) bezeichnet; siehe Grünert (1998).

<sup>393</sup> Siehe umfassend Domschke (1997), S. 104 ff.



$$\delta_{ikt} = \begin{cases} 1, & \text{wenn in Periode } t \text{ ein Rüstvorgang von Produkt } i \text{ auf Produkt } k \text{ erfolgt} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Aufgrund der Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstvorgänge sind die Rüstzeiten  $t_{sik}$  und die Rüstkosten  $sc_{ik}$  für Produkt  $k$  abhängig vom zuvor gefertigten Produkt  $i$ . Des Weiteren wird eine Hilfsvariable  $\pi_{kt}$  benötigt, mit der die Produktionsreihenfolge innerhalb einer Periode auf der jeweiligen Maschine bestimmt werden kann. Mit Hilfe der Variablen  $\delta_{ikt}$  und  $\pi_{kt}$  lässt sich die Position von Produkt  $k$  in der Rüstfolge in der Periode  $t$  ableiten.<sup>394</sup> Eine Rüstübertragung in nachfolgende Perioden ist ebenfalls zulässig. Beim MLCLSD muss auch ein Rüstvorgang am Ende einer Periode abgeschlossen sein.<sup>395</sup> Zur Abbildung einer Rüstübertragung wird zusätzlich eine Binärvariable  $\omega_{kt}$  für Produkt  $k$  in Periode  $t$  eingeführt, mit Hilfe derer die Rüstübertragung für Produkt  $k$  von der Periode  $t - 1$  in die Periode  $t$  dargestellt werden kann. Die Rüstübertragungsvariable  $\omega_{kt}$  ist definiert als:

$$\omega_{kt} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Rüstzustand von Produkt } k \\ & \text{von Periode } t - 1 \text{ übertragen wird} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Darüber hinaus ist der Anfangsrüstzustand  $\hat{\omega}_k$  für jedes Produkt  $k$  bekannt.

Mit Hilfe der nachfolgend angeführten Notationen lässt sich das MLCLSD folgendermaßen mathematisch formulieren:

### Indizes und Indexmengen

|                 |  |
|-----------------|--|
| $k, i \in K$    | Menge der Produkte, $K = \{1, \dots, K\}$                    |
| $m \in M$       | Menge der Maschinen, $M = \{1, \dots, M\}$                   |
| $t, \tau \in T$ | Menge der Perioden, $T = \{1, \dots, T\}$                    |
| $K_m$           | Menge der Produkte, welche auf Maschine $m$ gefertigt werden |
| $N_k$           | Menge der direkten Nachfolger von Produkt $k$                |

### Parameter

|            |  |
|------------|--|
| $a_{ki}$   | Direktbedarfskoeffizient bezüglich Produkt $k$ und Produkt $i$             |
| $b_{kt}$   | hinreichend große Zahl für Produkt $k$ in Periode $t$                      |
| $cp_{mt}$  | verfügbare Kapazität auf Ressource $m$ in Periode $t$                      |
| $d_{kt}$   | Primärbedarf nach Produkt $k$ in Periode $t$                               |
| $d_{kt}^n$ | Nettonachfrage nach Produkt $k$ in Periode $t$                             |
| $h_{ck}$   | Lagerkostensatz für eine Mengeneinheit [ME] von Produkt $k$ in Periode $t$ |
| $o_{cm}$   | Kostensatz für eine Überstunde auf Ressource $m$                           |
| $sc_k$     | Rüstkostensatz von Produkt $k$   |

<sup>394</sup> Vgl. Tempelmeier (2008a), S. 176.

<sup>395</sup> Vgl. Sahling (2010), S. 28.

|                  |  |
|------------------|--|
| $tp_k$           | Stückbearbeitungszeit von Produkt $k$                                |
| $t_{sk}$         | Rüstzeit von Produkt $k$   |
| $vp_k$           | Vorlaufverschiebung von Produkt $k$                                  |
| $sc_{ik}$        | Rüstkostensatz für einen Rüstvorgang von Produkt $i$ auf Produkt $k$ |
| $ts_{ik}$        | Rüstzeit für einen Rüstvorgang von Produkt $i$ auf Produkt $k$       |
| $\hat{\omega}_k$ | Anfangsrüstzustand von Produkt $k$                                   |

### Entscheidungsvariablen

|               |  |
|---------------|--|
| $O_{mt}$      | Überstunden auf Maschine $m$ in Periode $t$                                |
| $Q_{kt}^P$    | Produktionsmenge (Losgröße) von Produkt $k$ in Periode $t$                 |
| $Y_{kt}$      | Lagerbestand von Produkt $k$ am Ende von Periode $t$                       |
| $\gamma_{kt}$ | binäre Rüstzustandsvariable von Produkt $i$ auf Produkt $k$ in Periode $t$ |
| $\omega_{kt}$ | binäre Rüstübertragungsvariable für Produkt $k$ in Periode $t$             |
| $s_{ikt}$     | binäre Rüstvariable von Produkt $i$ auf Produkt $k$ in Periode $t$         |
| $\pi_{kt}$    | Position von Produkt $k$ in der Rüstfolge der Periode $t$                  |

### Modell MLCLSD:<sup>396 397</sup>

$$\min Z = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} (h_{ck} \cdot Y_{kt} + \sum_{i \in K} sc_{ik} \cdot \delta_{ikt}) + \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} oc_m \cdot O_{mt} \quad (\text{Gleichung 44})$$

unter den Nebenbedingungen (Gleichungen 45 bis 54):

$$Y_{k,t-1} + Q_{k,t-vp_k}^P - \sum_{i \in N_k} a_{ki} \cdot Q_{it}^P - Y_{kt} = d_{kt} \quad \forall k, t \quad (\text{Gleichung 45})$$

$$\sum_{k \in K_m} (tp_k \cdot Q_{kt}^P + \sum_{i \in K_m} ts_{ik} \cdot \delta_{ikt}) \leq cp_{mt} + O_{mt} \quad \forall m, t \quad (\text{Gleichung 46})$$

$$Q_{kt}^P \leq b_{kt} \cdot (\sum_{i \in K} \delta_{ikt} \cdot \omega_{kt}) \quad \forall k, t \quad (\text{Gleichung 47})$$

$$\sum_{k \in K_m} \omega_{kt} = 1 \quad \forall t, m \quad (\text{Gleichung 48})$$

$$\omega_{kt} + \sum_{i \in K} \delta_{ikt} - \sum_{j \in K} \delta_{kjt} = \omega_{k,t+1} \quad \forall k, t \quad (\text{Gleichung 49})$$

$$\pi_{kt} \geq \pi_{it} + 1 - |K_m| \cdot (1 - \delta_{ikt}) \quad \forall t, m, i \in K_m, k \in K_m \text{ mit } k \neq i \quad (\text{Gleichung 50})$$

$$Y_{k0}, Y_{kt} \text{ gegeben} \quad \forall k \quad (\text{Gleichung 51})$$

$$\omega_{k1} = \hat{\omega}_k \quad \forall k \quad (\text{Gleichung 52})$$

$$O_{mt}, Q_{kt}^P, Y_{kt}, \pi_{kt} \geq 0 \quad \forall k, m, t \quad (\text{Gleichung 53})$$

$$\delta_{ikt}, \omega_{kt} \in \{0,1\} \quad \forall i, k, t \quad (\text{Gleichung 54})$$

<sup>396</sup> Vgl. Haase (1996), S. 53 f. für das CLSD und Grünert (1998), S. 52 ff. für das MLCLSD.

<sup>397</sup> Siehe Sahling (2010), S. 19 ff.

Die Zielfunktion  $Z$  (Gleichung 44) minimiert die anfallenden Gesamtkosten, welche sich aus den Lager-, Rüst- und Überstundenkosten zusammensetzen. Die Produktionskosten werden bei diesem Modell als konstant angenommen aufgrund der Argumentation, dass die Produktionskosten innerhalb der Losgrößenplanung nur dann berücksichtigt werden müssen, wenn sich diese im Zeitablauf ändern oder abhängig von der Losgröße bzw. der gewählten Maschine sind.<sup>398</sup> Die Lagerhaltungskosten, bewertet über den Lagerkostensatz (besteht in der Regel hauptsächlich aus Kapitalbindungskosten) für ein Produkt lassen sich vom Lagerbestand am Ende einer Periode ableiten. Der Planungszeitraum ist in  $T$  diskrete Perioden ( $t = 1, \dots, T$ ) unterteilt. Die Herstellung der  $K$  Produkte erfolgt auf  $m$  nichtidentischen Maschinen ( $m = 1, \dots, M$ ) mit begrenzten Kapazitäten. Eine oder mehrere Maschineneinheiten (z.B. gleichartige Maschinen und Arbeitskräfte) werden zu einer Ressource aggregiert. Für jedes Produkt  $k$  existiert eine eindeutige Zuordnung zu einer Maschine  $m$ . In der Menge  $K_m$  sind die Produkte  $k$  enthalten, die ausschließlich auf der Maschine  $m$  gefertigt werden. Daher wird das Produkt  $k$  als Ergebnis eines geschlossenen Arbeitsganges auf einer Ressource angesehen. In der Periode  $t$  steht auf der Ressource  $m$  die Kapazität  $cp_{mt}$  zur Verfügung. Diese kann durch den Einsatz von Überstunden in jeder Periode erhöht werden. Der Einsatz von Überstunden wird mit den Kosten  $o_{cm}$  je Zeiteinheit [ZE] bewertet. Diese Kosten können aber auch mit den Strafkosten für Aufträge, welche nicht termintreu gefertigt werden, gleichgesetzt werden. Für die Herstellung einer Mengeneinheit (ME) von Produkt  $k$  wird eine Bearbeitungszeit  $tp_k$  berücksichtigt. Um die Bestimmung der reihenfolgeabhängigen Rüstkosten eines Produktes durchführen zu können, muss zusätzlich noch das zuvor gefertigte Produkt betrachtet werden. Für Produkt  $k$  ist in Periode  $t$  ein Primärbedarf  $d_{kt}$  gegeben. Dieser kann im Zeitablauf schwanken und ist ohne Fehlmengen in der jeweiligen Periode  $t$  zu erfüllen. Um die Nachfrage in späteren Perioden bedienen zu können, besteht die Möglichkeit die Produkte zu lagern.<sup>399</sup> Für die Lagerung einer Mengeneinheit [ME] von Produkt  $k$  fallen pro Periode die Lagerkosten  $h_{ck}$  an. Die Lagerbilanzgleichungen (Gleichung 45) stellen sicher, dass sowohl der Primärbedarf  $d_{kt}$  als auch der Sekundärbedarf  $\sum_{i \in N_k} a_{ki} \cdot Q_{it}^P$  für Produkt  $k$  in Periode  $t$ , wobei  $a_{ki}$ <sup>400</sup> die Input- und Outputbeziehungen zwischen zwei Erzeugnissen  $k$  und  $i$  darstellt, vollständig erfüllt werden. Fehlmengen und Nachlieferungen sind nicht zulässig. Zusätzlich ist für Produkt  $k$  die Vorlaufverschiebung  $vp_k$  zu berücksichtigen, welche sicherstellt, dass die Komponenten für die Herstellung nachgelagerter Produkte zur Verfügung stehen.<sup>401</sup> Bei den Kapazitätsrestriktionen (Gleichung 46) ist wie bei der Zielfunktion ebenfalls das Vorgängerprodukt zur Bestimmung der Rüstzeiten von Produkt  $k$  zu beachten. Die Restriktionen (Gleichung 47) verknüpfen die binären Rüstvariablen  $\delta_{ikt}$  mit den Produktionsmengen  $Q_{kt}^P$ , wobei

<sup>398</sup> Vgl. Schneider et al. (2005), S. 47.

<sup>399</sup> Voraussetzung dafür ist die Lagerfähigkeit der Produkte.

<sup>400</sup> Dieser gibt die Anzahl der Mengeneinheiten von Produkt  $k$ , die zur Fertigung einer Einheit seines Nachfolgerproduktes  $i \in N_k$  benötigt werden, an. Die Input- und Outputbeziehungen führen zum abgeleiteten Sekundärbedarf für die Komponenten, welcher ebenfalls rechtzeitig zur Verfügung stehen muss, um die Herstellung der nachgelagerten Produkte zu gewährleisten.

<sup>401</sup> Vgl. Derstroff (1995), S. 28 f.; Buschkühl et al. (2010), S. 5.

der hinreichend große Parameter  $b_{kt}$  die Gesamtnettonachfrage für Produkt  $k$  von der Periode  $t$  bis zum Ende des Planungshorizonts  $T$  abbildet. Eine Produktion von Produkt  $k$  in Periode  $t$  ist allerdings nur dann möglich ( $Q_{kt}^p > 0$ ), wenn von einem anderen Produkt  $i$  auf Produkt  $k$  gerüstet wird ( $\sum_i \delta_{ikt} = 1$ ) oder der Rüstzustand von Produkt  $k$  aus der Vorperiode übernommen wird ( $\omega_{kt} = 1$ ).

Die Nebenbedingungen (Gleichung 48) gewährleisten den Erhalt des Rüstzustandes für ein Produkt  $k \in K_m$  auf der Maschine  $m$  in der Periode  $t$ . Die Gleichung 49 bildet Flussbedingungen ab: Mit Hilfe dieser Nebenbedingung lässt sich der Rüstzustand für das Produkt  $k$  zu Beginn der Periode  $t + 1$  ableiten. Ein Rüstzustand für Produkt  $k$  kann in der nachfolgenden Periode  $t + 1$  übertragen werden ( $\omega_{k,t+1} = 1$ ), wenn

1. der Rüstzustand bereits aus der Periode  $t - 1$  übernommen wurde ( $\omega_{kt} = 1$ ) oder
2. in der Periode  $t$  von einem anderen Produkt  $i$  auf dieses Produkt  $k$  gerüstet wird ( $\delta_{ikt} = 1$ ).

In beiden Fällen darf kein Rüstvorgang ausgehend von Produkt  $k$  auf ein anderes Produkt  $j$  erfolgen ( $\delta_{kjt} = 0$ ). Die so genannten Subtour-Eliminationsbedingungen<sup>402</sup> (Gleichung 50) verbieten eine Rückkehr zu einem Produkt innerhalb einer Rüstsequenz in der Periode  $t$ . Unter Zuhilfenahme der Variable  $\pi_{kt}$  kann die Rüstreihenfolge bestimmt werden, innerhalb der die Produkte einer Periode gefertigt werden. Wenn in der Periode  $t$  von Produkt  $i$  auf Produkt  $k$  gerüstet wird ( $\delta_{ikt} = 1$ ), so gilt  $\pi_{kt} \geq 1 + \pi_{it}$  auf Grund der Nebenbedingung in Gleichung 50. Erfolgt kein Rüstvorgang von Produkt  $i$  auf Produkt  $k$  in der Periode  $t$ , d.h.  $\delta_{ikt} = 0$ , ist die Nebenbedingung immer erfüllt. Der Lageranfangs- und Lagerendbestand wird durch die Bedingungen in Gleichung 51 vorgegeben. Durch die Gleichung 52 ist der Anfangsrüststand  $\hat{\omega}_k$  für Produkt  $k$  zu Beginn der ersten Periode gegeben. Abschließend folgen noch die Nichtnegativitätsbedingungen (Gleichung 53) sowie die Binärbedingungen (Gleichung 54) für das Losgrößenmodell MLCLSD.

Im Nachfolgenden wird nun ein Lösungsansatz für das MLCLSD-Modell beschrieben, welcher auf Förster, Haase und Tönnis<sup>403</sup> zurückgeht:<sup>404</sup>

Für die Lösung des MLCLSD-Problems verwenden die Autoren ein Verfahren der mathematischen Programmierung (MP). Mit Hilfe des Lösungsansatzes einer Fix&Relax-Heuristik (F&R-Heuristik), welche die Anzahl der gleichzeitig zu betrachtenden Binärvariablen reduziert und vom Ausgangsproblem kleine Unterprobleme durch Aufteilung der Binärvariablen innerhalb eines Unterproblems in drei paarweise disjunkte Mengen ableitet, können die Optimalwerte der Binärvariablen in der ersten Menge des aktuellen Unterproblems gefunden werden.

<sup>402</sup> Vgl. Tempelmeier (2008a), S. 176; zur Problematik der Subtours beim TSP siehe ausführlich Domschke (1997), S. 105 ff. sowie Suhl (2006), S. 244 f.

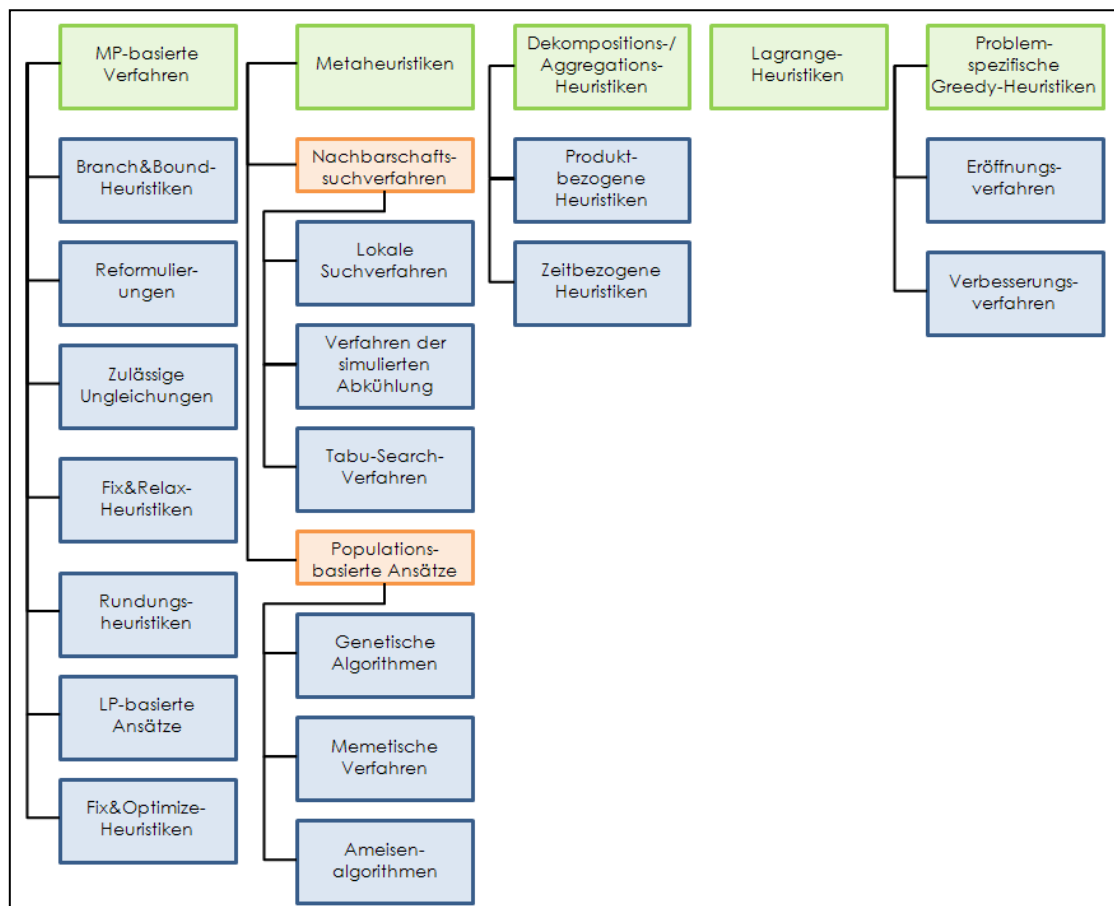
<sup>403</sup> Siehe Förster et al. (2006), S. 1255-1274.

<sup>404</sup> Siehe umfassend zu Lösungsansätze für mehrstufige Losgrößenprobleme mit Kapazitätsrestriktionen: Sahling (2010), S. 43 ff.

Gleichzeitig werden die ursprünglichen Binärvariablen in der zweiten Menge nur relaxiert betrachtet, während die verbleibenden Binärvariablen bereits aus einer vorherigen Iteration fixiert werden.<sup>405</sup> So beschreiben Förster et al. eine F&R-Heuristik mit rollierenden Planungsfenstern zur Lösung des MLCLSD unter einer LP-Relaxation<sup>406</sup> und einer Standardmodellformulierung, wobei jeweils die optimal gelösten Binärvariablen fixiert und das Planungsfenster verschoben wird. Das Planungsfenster endet, sobald das Ende des Planungshorizonts erreicht ist.

### 3.4.2.2 Algorithmische Lösungsansätze für mehrstufige, dynamische Losgrößenmodelle mit Kapazitätsrestriktionen

Nachfolgend wird nun eine mögliche Klassifizierung der algorithmischen Ansätze zur Lösung von mehrstufigen dynamischen Losgrößenmodellen mit Kapazitätsrestriktionen aufgezeigt (Abbildung 38). Im Anschluss daran erfolgt die Auflistung der von 1990 bis 2011 entwickelten Algorithmen zur Lösung dieser Problematiken (siehe Abbildungen 39 bis 43).



**Abbildung 38: Klassifizierung der Lösungsansätze für mehrstufige dynamische Losgrößenprobleme mit Kapazitätsrestriktionen<sup>407</sup>**

<sup>405</sup> Vgl. Pochet et al. (2006), S. 109 ff.

<sup>406</sup> Bei einer LP (Abkürzung entstammt der Linearen Programmierung)-Relaxation werden die Ganzzahligkeitsbedingungen für gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme vernachlässigt, indem die relaxierten Binärvariablen reelle Werte im Intervall  $[0, 1]$  annehmen dürfen; siehe dazu umfassend Domschke et al. (2007), S. 136 f.

<sup>407</sup> In Anlehnung an Buschkühl et al. (2010), S. 8.

Wie in Abbildung 38 dargestellt, können algorithmische Ansätze grob in *MP<sup>408</sup>-basierte Verfahren*, in *Metaheuristiken*, in *Dekompositions- und Aggregations-Heuristiken*, in *Lagrange-Heuristiken* und in *problemspezifische Greedy-Verfahren* unterteilt werden.

Viele Lösungsansätze basieren auf *Verfahren der mathematischen Programmierung (MP)*, welche sich in mathematisch exakte Verfahren und Heuristiken unterscheiden lassen. Für mathematisch exakte Verfahren lässt sich die Konvergenz gegen ein existierendes Optimum beweisen, Heuristiken versuchen innerhalb einer kurzen Zeit eine möglichst gute und zulässige Lösung in der Nähe des Optimums zu bestimmen, indem nur Teile des Lösungsraums untersucht werden.<sup>409</sup>

Zu den MP-basierten Verfahren zählen *Branch&Bound-Heuristiken*, *Reformulierungen*, *zulässige Ungleichungen*, *Fix&Relax-Heuristiken*, *Rundungsheuristiken*, *LP-basierte Ansätze* und *Fix&Optimize-Heuristiken*. In der nachfolgenden Abbildung 39 sind die entwickelten Lösungsansätze, welche auf den verschiedenen MP-basierten Verfahren beruhen, aufgelistet. Auf eine Erläuterung der einzelnen Verfahren wird an dieser Stelle verzichtet.<sup>410</sup>

| MP-basierte Verfahren    | Metaheuristiken | Dekompositions-/ Aggregations-Heuristiken | Lagrange-Heuristiken                             | Problem-spezifische Greedy-Heuristiken |
|--------------------------|-----------------|---|--|--|
| Branch&Bound-Heuristiken |                 |   | MLCLSP<br>MLCLSP<br>MLCLSP                       |  |
| Reformulierungen         |                 |   | MCLSP-L  |  |
| Zulässige Ungleichungen  |                 |   | MLCLSP-L<br>MLCLSP<br>MLCLSP<br>MLCLSP<br>MLCLSP |  |
| Fix&Relax-Heuristiken    |                 |   | MLCLSP<br>MLCLSD<br>MLCLSP<br>MLCLSP             |  |
| Rundungsheuristiken      |                 |   | MLCLSP<br>MLCLSP<br>MLCLSP                       |  |
| LP-basierte Ansätze      |                 |   | MLCLSP<br>MLCLSP                                 |  |
| Fix&Optimize-Heuristiken |                 |   | MLCLSP-L   |  |

Abbildung 39: MP-basierte Verfahren<sup>411</sup>

<sup>408</sup> MP-basierte Verfahren basieren auf Verfahren der mathematischen Programmierung.

<sup>409</sup> Vgl. Zimmermann et al. (2001), S. 151.

<sup>410</sup> Siehe dazu umfassend Sahling (2010), S. 43 ff.

<sup>411</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Die zweite Gruppe der Lösungsansätze für mehrstufige dynamische Losgrößenmodelle bilden die *Metaheuristiken*, welche der Klasse der Verbesserungsverfahren zugeordnet werden, da diese versuchen, ausgehend von einer gegebenen Startlösung durch sukzessive kleine Veränderungen diese zu verbessern. Als Metaheuristik<sup>412</sup> wird eine allgemeine Strategie des Optimierungsprozesses bezeichnet, wobei kombinatorische Optimierungsprobleme möglichst flexibel gelöst werden sollen. Metaheuristiken lassen sich dabei in *Nachbarschaftssuchverfahren* und *populationsbasierte Verfahren* klassifizieren. Nachbarschaftssuchverfahren suchen ausgehend von einer Anfangslösung lokal begrenzte Bereiche des Lösungsraums, der von allen zulässigen Lösungen gebildet wird, iterativ ab. Um jedoch nicht nur ein lokales Optimum zu finden, werden im Zuge der Suche auch Lösungen erlaubt, welche eine zwischenzeitliche Verschlechterung des Zielfunktionswertes zulassen.<sup>413</sup> Bei populationsbasierten Verfahren werden im Gegensatz zu den Nachbarschaftssuchverfahren mehrere Lösungen gleichzeitig betrachtet, wobei den meisten Verfahren die Natur als Vorbild dient und diese somit der Evolution nachempfundene leistungsfähige Suchverfahren darstellen. Wie in der tatsächlichen Evolution wird eine Population von Individuen betrachtet, wobei jede Lösung ein Individuum abbildet, welches einen konkreten Zielfunktionswert repräsentiert.<sup>414</sup> Die Suche wird so lange fortgesetzt bis entweder eine vordefinierte Anzahl an Iterationen oder eine vordefinierte Lösungsgüte erreicht ist.

Zu den Nachbarschaftssuchverfahren zählen *Lokale Suchverfahren*, *Verfahren der simulierten Abkühlung* und *Tabu-Search-Verfahren*. Die populationsbasierten Ansätze beinhalten *genetische Algorithmen*, *memetische Verfahren* und *Ameisenalgorithmen*. Eine Auflistung der entwickelten Metaheuristiken für die jeweiligen dynamischen, mehrstufigen Losgrößenmodelle mit Kapazitätsrestriktionen erfolgt in Abbildung 40.

---

<sup>412</sup> Vgl. Suhl et al. (2006), S. 12.

<sup>413</sup> Vgl. Domschke et al. (1997), S. 47.

<sup>414</sup> Vgl. Teich (2002), S. 343.

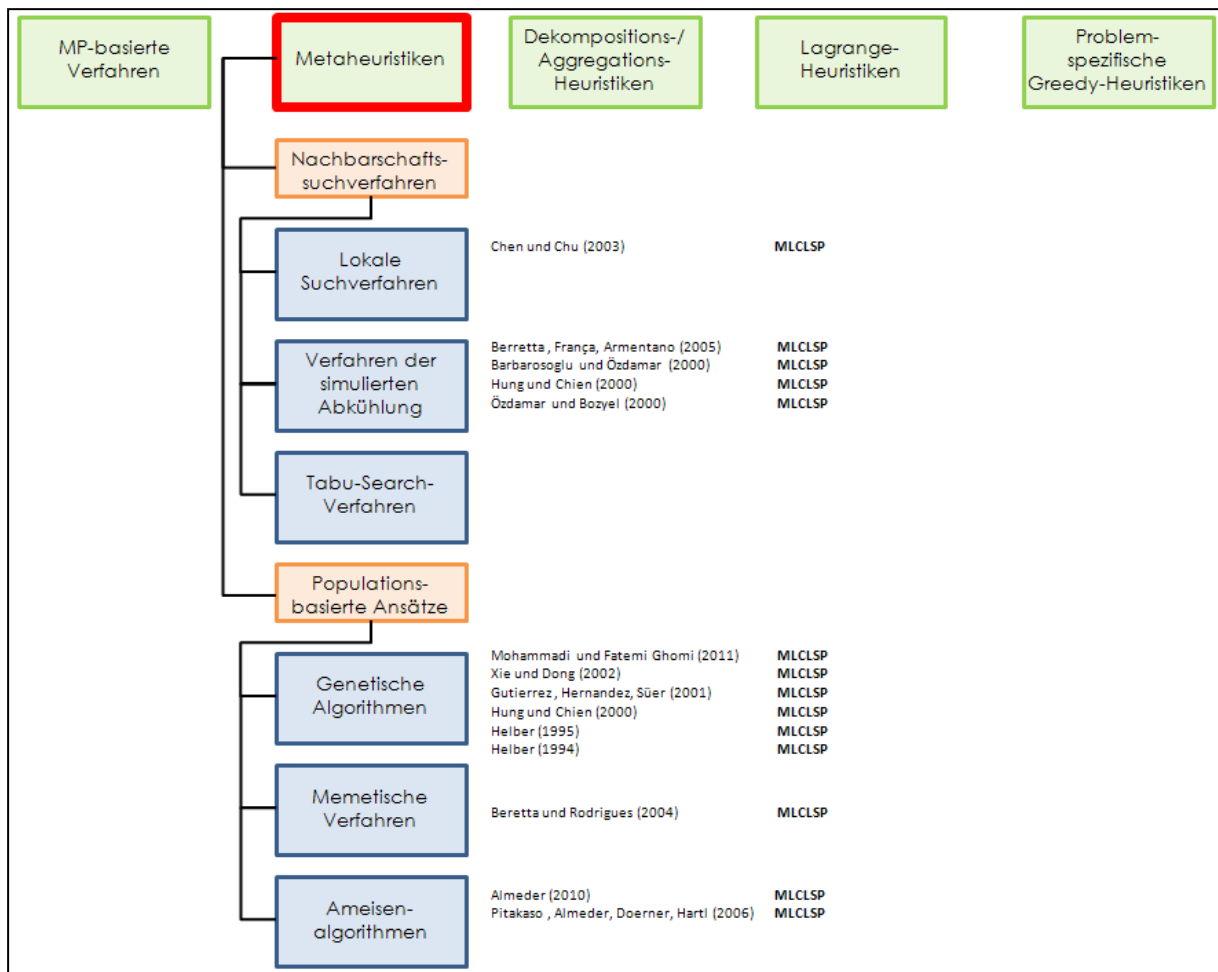


Abbildung 40: Metaheuristiken<sup>415</sup>

Die nächste Gruppe der algorithmischen Lösungsansätze umfasst die *Dekompositions- und Aggregations-Heuristiken*. Die Grundidee der Dekompositions- und Aggregationsansätze besteht darin, die Größe des Ausgangsproblems durch Unterteilung in Unterprobleme zu reduzieren, welche jeweils unabhängig voneinander gelöst werden können. Nach der Lösung der Unterprobleme werden dessen Ergebnisse zu einer zulässigen Gesamtlösung zusammengefügt. Bei den Aggregationsansätzen wird der Detaillierungsgrad des Ausgangsproblems verringert. Die vereinfachten Probleme werden dann gelöst und im Anschluss zu einer zulässigen Lösung für das Ausgangsproblem disaggregiert.<sup>416</sup> Die Dekompositions- und Aggregations-Heuristiken lassen sich je nach den gewählten Unterteilungskriterien des Ausgangsproblems in *produktbezogene* oder *zeitbezogene Heuristiken* unterscheiden. Eine Darstellung der dazu entwickelten Verfahren bietet Abbildung 41.

<sup>415</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>416</sup> Vgl. Sahling (2010), S. 46.



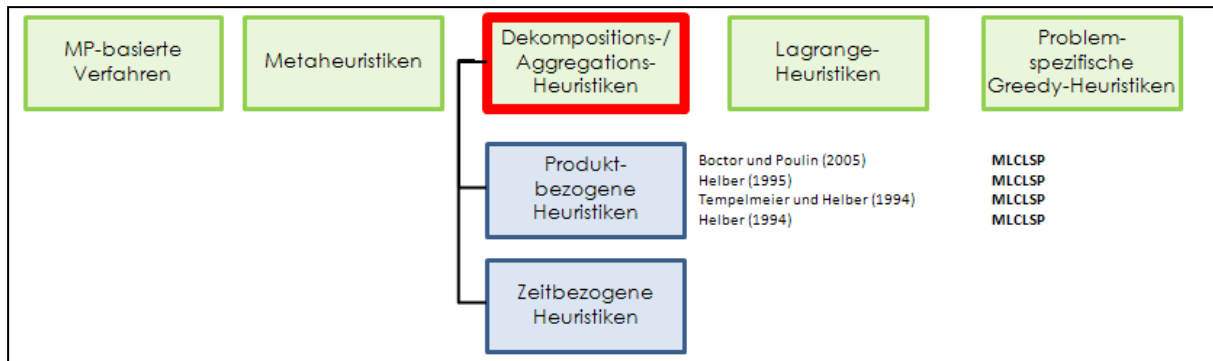


Abbildung 41: Dekompositions-/Aggregationsverfahren<sup>417</sup>

Bei den *Lagrange-Heuristiken* handelt es sich um ein auf der so genannten Lagrange-Relaxation basierendes iteratives Lösungsverfahren. Bei dieser werden kritische Nebenbedingungen eines Problems relaxiert betrachtet. Dazu werden diese mit so genannten Lagrange-Multiplikatoren bewertet und in die Zielfunktion aufgenommen. Somit sind diese Restriktionen nicht mehr im System der Nebenbedingungen enthalten. Die Lösung der Lagrange-Relaxation stellt eine neue untere Schranke für das Ausgangsproblem dar. Anschließend wird daraus mit Hilfe einer problemspezifischen Heuristik eine neue zulässige Lösung konstruiert, die als neue obere Schranke für das Ausgangsproblem dient. Zum Abschluss einer Iteration werden die Lagrange-Multiplikatoren aktualisiert.<sup>418</sup> Unter Verwendung der optimalen Lagrange-Multiplikatoren soll sich die Lösung des relaxierten Problems möglichst dicht an der optimalen Lösung des Ausgangsproblems befinden. Für die Konstruktion einer zulässigen Lösung in der Nähe des Optimums sind dann nur noch wenige Veränderungen notwendig.<sup>419</sup> In Abbildung 42 erfolgt die Auflistung der entwickelten Lösungsansätze mit Lagrange-Heuristiken für die mehrstufigen, dynamischen Losgrößemodelle mit Kapazitätsrestriktionen.

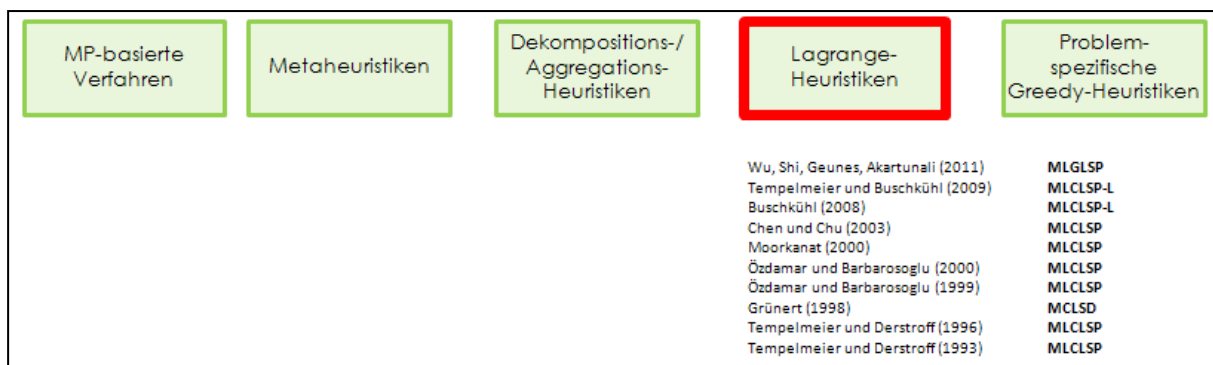


Abbildung 42: Lagrange-Heuristiken<sup>420</sup>

Die letzte Gruppe der algorithmischen Ansätze stellen die *problemspezifischen Greedy-Heuristiken* dar. Greedy-Heuristiken erzeugen eine Lösung, indem sukzessiv immer jene Schritte vorgenommen werden, welche die Lösung zu diesem Zeitpunkt am stärksten verbessert, ohne

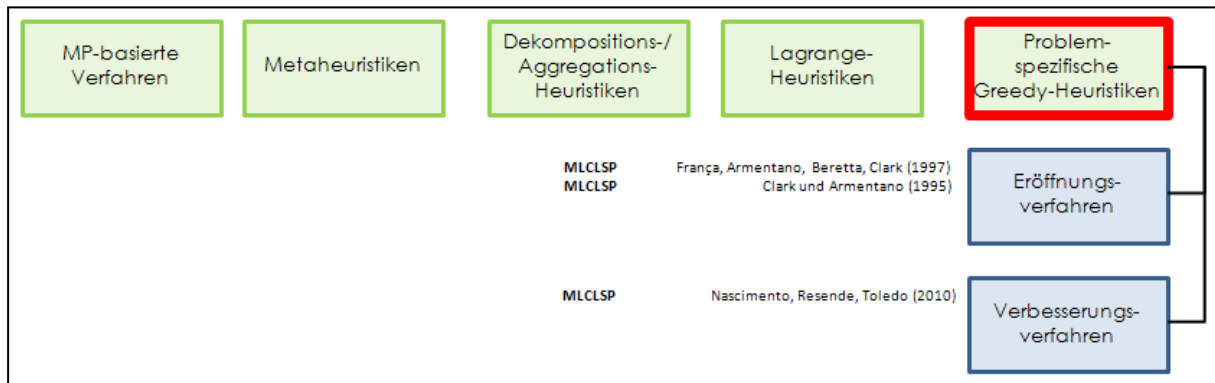
<sup>417</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>418</sup> Vgl. Sahling (2010), S. 44 f.

<sup>419</sup> Vgl. Beasley (1995), S. 243 ff.

<sup>420</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

jedem einen Rückschritt oder eine Verzweigung vorzunehmen.<sup>421</sup> Dabei kann wiederum zwischen *Eröffnungsverfahren*, bei welchen eine Startlösung gesucht wird und *Verbesserungsverfahren*, welche eine gegebene Lösung iterativ verbessern, differenziert werden. Eine Auflistung der dazu entwickelten Ansätze bietet Abbildung 43.



**Abbildung 43: Problemspezifische Greedy-Verfahren<sup>422</sup>**

Im Anschluss erfolgt nun die Vorstellung eines weiteren Ansatzes zur Losgrößenbestimmung, welcher sich sehr stark von den im Vorhinein beschriebenen Modellen unterscheidet und dadurch entstanden ist, dass den bisher vorgestellten Verfahren zur Losgrößenbestimmung u.a. die Vernachlässigung des Einflusses der Losgröße auf die Durchlaufzeiten und die Bestandsbindung während der Produktion unterstellt wird.

### 3.4.2.3 Durchlauforientiertes Verfahren der Losgrößenbestimmung

Im Folgenden wird das Verfahren zur Durchlauforientierten Losgrößenbestimmung (DOLOS) nach Nyhuis vorgestellt, welches seinen Vorteil vor allem darin sieht, dass die vorhin beschriebenen dynamischen Losgrößenverfahren zwar sehr exakte Lösungen bieten, jedoch die zeitpunktgenaue Kenntnis diverser Größen, welche zur Berechnung notwendig sind oftmals in der Praxis nicht gegeben sind und vor allem den Nachteil aufweisen, dass realitätsnahe Modelle in einer sehr komplexen und zeitintensiven Berechnung resultieren. Ebenso sind die Durchführungszeiten wie auch die Liegezeiten in der Produktion (Übergangszeiten) und als Folge die erreichbaren Durchlaufzeiten losgrößenabhängige Kapitalbindungszeiten und müssen in die Berechnung einer wirtschaftlichen Losgröße einbezogen werden.

Das Verfahren der Durchlauforientierten Losgrößenbestimmung basiert auf den Erkenntnissen der Kennlinientheorie, welche zeigt, dass die in einer Produktion minimal erreichbaren Durchlaufzeiten und Bestände maßgeblich durch die Fertigungslosgrößen bestimmt sind, indem die von der Losgröße abhängigen bestands- und durchlaufzeitwirksamen Zeiten ermittelt und in die Bestandskosten überführt werden.<sup>423</sup> Das daraus abgeleitete Verfahren zeichnet sich

<sup>421</sup> Vgl. Feldmann (1999), S. 1.

<sup>422</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>423</sup> Vgl. Nyhuis (1991), S. 93 ff.

dadurch aus, dass die Kapitalbindung während des vollständigen Auftragsdurchlaufs durch die Produktion zugrunde gelegt wird, während bei den vorhin erwähnten Ansätzen die Produktionskosten als konstant angesehen werden und die Kapitalbindung nur in den Lagerstufen Berücksichtigung findet. In Abbildung 44 sind die Kapitalbindungskosten eines Auftrags während des Produktionsprozesses abgebildet, wobei  $x_{\text{DOLOS}}$ , die durch das Durchlauforientierte Losgrößenbestimmungsverfahren ermittelte Losgröße darstellt und  $x_{\text{Grundmodell}}$  die optimale Losgröße nach Amler repräsentiert.

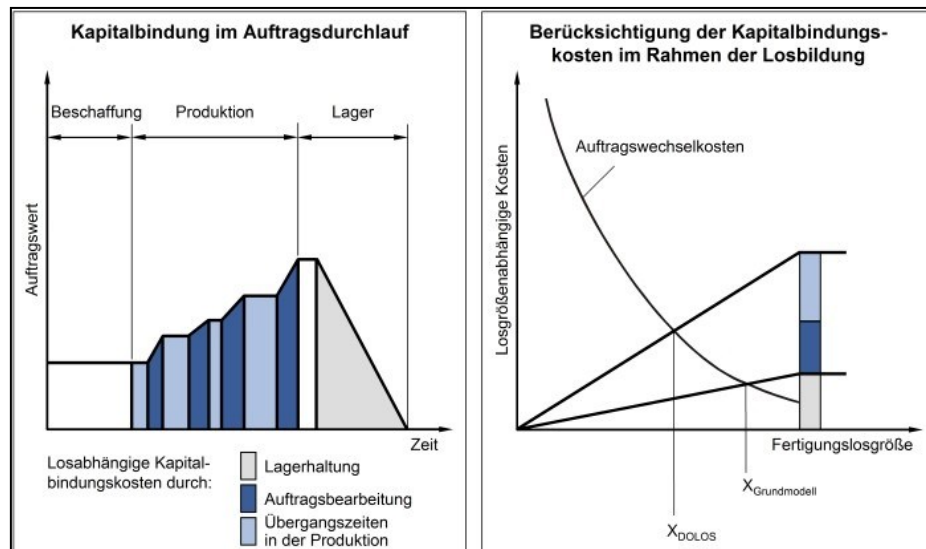


Abbildung 44: Prinzip der Durchlauforientierten Losgrößenbestimmung<sup>424</sup>

Für wirtschaftlich orientierte Losgrößenbestimmungsverfahren gilt generell, dass sich das Kostenoptimum genau dort ergibt, wo sich die Auftragswechselkosten (im Wesentlichen die Rüstkosten) und die Kapitalbindungskosten decken. Diese Annahme gilt auch für das Durchlauforientierte Losgrößenbestimmungsverfahren. Die Ableitung und die Berechnungsformel der optimalen durchlauforientierten Losgröße werden nachfolgend erläutert:<sup>425</sup>

### Variablen

|       |                                  |
|-------|----------------------------------|
| $K_L$ | Losabhängige Kosten [€]          |
| $m$   | Bedarf [Stück]                   |
| $s$   | Herstellkosten [€/Stück]         |
| $E$   | Auftragswechselkosten je Los [€] |
| $p$   | Kapitalbindungssatz [%]          |
| $x$   | Losgröße [Stück]                 |
| $s_0$ | Materialkosten [€/Stück]         |
| $t_e$ | Bearbeitungszeit [min/Stück]     |

<sup>424</sup> Nyhuis (2008), S. 214.

<sup>425</sup> Zur detaillierten Berechnung siehe Nyhuis (1991).

|       |   |
|-------|---|
| $KAP$ | Kapazität je Tag [Std/BKT]                    |
| $FG$  | Flussgrad [] wobei $FG = \frac{ZDF+ZUE}{ZDF}$ |
| $ZDF$ | Durchführungszeit [BKT]                       |
| $ZUE$ | Übergangszeit [BKT]                           |

**Losabhängige Kosten  $K_L$ :**

$$K_L = \frac{m}{x} \cdot \sum_{i=1}^n E_i + \frac{p \cdot s \cdot x}{200} + \frac{(s + s_0) \cdot p \cdot m}{200 \cdot UZ} \cdot \sum_{i=1}^n ZDF_i + \frac{(s + s_0) \cdot p \cdot m}{200 \cdot UZ} \cdot \sum_{i=1}^n ZUE_i \quad (\text{Gleichung 55})$$

wobei

$$\text{Auftragswechselkosten } K_{AW} = \frac{m}{x} \cdot \sum_{i=1}^n E_i \quad (\text{Gleichung 56})$$

$$\text{Lagerhaltungskosten } K_{LH} = \frac{p \cdot s \cdot x}{200} \quad (\text{Gleichung 57})$$

$$\text{Fertigungsbestandskosten (Durchführungszeit) } K_{ZDF} = \frac{(s + s_0) \cdot p \cdot m}{200 \cdot UZ} \cdot \sum_{i=1}^n ZDF_i \quad (\text{Gleichung 58})$$

$$\text{Fertigungsbestandskosten (Übergangszeit) } K_{ZUE} = \frac{(s + s_0) \cdot p \cdot m}{200 \cdot UZ} \cdot \sum_{i=1}^n ZUE_i \quad (\text{Gleichung 59})$$

Die optimale Losgröße nach DOLOS ergibt sich aus:

$$\frac{dK_L}{dx} := 0$$

$$x_{DOLOS} = \sqrt{\frac{200 \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n E_i}{p \cdot s + \frac{(s + s_0) \cdot p \cdot m \cdot FG}{60 \cdot UZ} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{t_{e,i}}{KAP}}} \quad (\text{Gleichung 60})$$

Die Kostenfunktion für die losabhängigen Kosten (Gleichung 55) setzt sich aus den Auftragswechselkosten (Gleichung 56), den Lagerhaltungskosten (Gleichung 57), den Fertigungsbestandskosten in Abhängigkeit der Durchlaufzeit (Gleichung 58) und der Übergangszeiten (Gleichung 59) zusammen. Zur Ermittlung der Übergangszeiten wird ein Ziel-Flussgrad herangezogen, der im Rahmen einer logistischen Positionierung festzulegen ist.<sup>426</sup> Aus dieser Kostenfunktion lässt sich durch Ableitung der Kostenfunktion nach der Stückzahl und Nullsetzen die optimale Losgröße (Gleichung 60) bestimmen.

Die dem Verfahren zugrundeliegenden Übergangszeiten werden im Allgemeinen nicht bei dem Auftrag anfallen, für welchen diese ermittelt wurden. Dies impliziert, dass andere Aufträ-

<sup>426</sup> Vgl. Nyhuis (1991), S. 99 ff; Nyhuis et al. (2003), S. 183.

ge während der Bearbeitung des betrachteten Auftrages auf frei werdende Kapazitäten warten müssen. Diese Übergangszeiten sind umso länger, je größer der Arbeitsinhalt des betrachteten Auftrages ist und je größer die Warteschlangen (ausgedrückt über den Flussgrad) sind. Da dies beim DOLOS-Verfahren berücksichtigt wird, kann eine verursachungsorientierte Kostenzuordnung erfolgen.<sup>427</sup> Das Durchlauforientierte Losgrößenbestimmungsverfahren ergänzt das Grundmodell von Andler<sup>428</sup> und stellt somit einen statischen Ansatz dar. Auch eine analoge Integration der während der Durchlaufzeit entstehenden Kapitalbindungskosten in dynamische Verfahren, wie beispielsweise der gleitenden wirtschaftlichen Losgröße, ist möglich.<sup>429</sup>

Da das DOLOS-Verfahren zur Berechnung kleinerer Losgrößen tendiert, werden Lose mit größeren Arbeitsinhalten stärker reduziert, also solche mit kleinem Auftragsvolumen (siehe dazu Abbildung 45). Somit kann durch das Verfahren eine Reduzierung und Harmonisierung der Auftragszeiten erzielt werden.<sup>430</sup> Damit können geringere Fertigungsbestände in der Produktion und kürzere Durchlaufzeiten bei gleichzeitiger Verringerung der losgrößenabhängigen Kosten realisiert werden.<sup>431</sup>

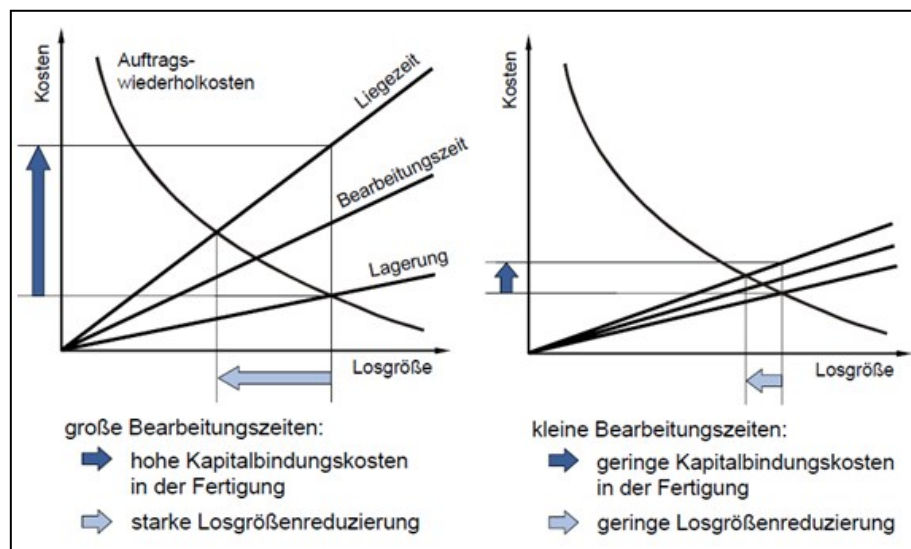


Abbildung 45: Harmonisierung der Auftragszeiten durch DOLOS-Verfahren<sup>432</sup>

### 3.4.3 Beurteilung der Anwendbarkeit der vorgestellten Losgrößenverfahren

Als Fazit der in Abschnitt 3.4.2 vorgestellten Ansätze zur Losgrößenmodellierung kann festgehalten werden, dass für die Bestimmung der geeigneten Produktionslosgröße, nicht nur in Bezug auf ein hybrides Produktionssystem, eine reine Kostenbetrachtung heranzuziehen (in den

<sup>427</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 213.

<sup>428</sup> Siehe dazu Anhang C, S. 287 ff.

<sup>429</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 214.

<sup>430</sup> Vgl. Nyhuis (1991), S. 105.

<sup>431</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 214.

<sup>432</sup> Vgl. Busse et al. (2006), S. 13.

klassischen Modellen werden dazu meist die Auftragswechsel- und Lagerhaltungskosten herangezogen, jüngere Modelle beziehen auch schon Strafkosten für verspätete/nicht realisierte Aufträge sowie Anlaufkosten mit ein) nicht ausreichend ist. Diese Erkenntnis führte mitunter dazu, dass die Losgrößenmodelle um die Reihenfolgeplanung erweitert wurden. Viel entscheidender ist aber die Tatsache, dass zunächst ein Modell gefunden werden muss, welches den Einfluss und die Auswirkungen der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen bestimmt. Daher wird im Zuge dieser Arbeit, ein Modell entwickelt, welches den Zusammenhang zwischen der in einer Produktion herrschenden Auslastung und den daraus resultierenden Durchlaufzeiten, Termintreuen und Beständen sowie der von der Losgröße und Reihenfolge abhängigen Leer-, Umstell-, Einstell-, Rüst-, bestands- und durchlaufzeitwirksamen Zeiten beschreibt, um darauf aufbauend die Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen vornehmen zu können.

Die Herausforderung an Losgrößen- und Reihenfolgemodelle, welche sich für hybride Produktionssysteme und deren Anwendbarkeit in der betrieblichen Praxis ergeben, liegt darin, dass gerade in diesen Produktionssystemen viele Restriktionen durch die zugrundeliegenden technologischen Verfahren auftreten, die meist nur mit sehr komplexen und rechenzeitintensiven Verfahren (siehe beispielhaft MLCLSD) berücksichtigt werden können, welche in der Praxis wenig Zuspruch finden. Dies ist ein wesentlicher Grund dafür, dass vermutlich (eine Studie diesbezüglich existiert nicht)<sup>433</sup> die klassische Losgrößenformel und das Modell nach Wagner und Within, trotz ihrer vielen Restriktionen und Annahmen, auch heute noch am öftesten in der betrieblichen Praxis eingesetzt werden.<sup>434</sup> <sup>435</sup> Ein möglicher Ansatz zur Losgrößenbestimmung für hybride Produktionssysteme könnte eine modifizierte Abhandlung – die auslastungsorientierte Losgrößenbestimmung – des in 3.4.2.3 vorgestellten Ansatzes sein. Aufgrund der Tatsache, dass sich ein hybrides Produktionssystem aus Prozessen der Stoffumwandlung und Stoffumformung zusammensetzt, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass kein Verfahren zur Losgrößenbestimmung durchgängig einsetzbar ist bzw. lässt sich dahingehend die Behauptung aufstellen, dass im Falle der Stoffumwandlungsprozesse kein Losgrößenverfahren benötigt wird, da von einer Produktion mit Losgröße eins ausgegangen werden kann. Dennoch müssen für die Bestimmung der Losgröße bzw. zur Bewertung des Einflusses der Produktionslosgröße auf die Prozesse der Stoffumformung, die Interdependenzen zu den vorgelagerten Stoffumwandlungsprozessen Berücksichtigung finden. Um dies aber mit Sicherheit behaupten zu können, bedarf es der Analyse des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge sowohl auf die Logistikleistung als auch auf die Logistikkosten eines hybriden Produktionssystems (siehe dazu Abschnitt 4.2).

---

<sup>433</sup> Laut E-Mail von Herrn Prof. Horst Tempelmeier vom 13.04.2012.

<sup>434</sup> Laut E-Mail von Herrn Prof. Horst Tempelmeier vom 13.04.2012.

<sup>435</sup> Siehe umfassend dazu Tempelmeier (2008b).

## 3.5 Modellierung logistischer Systeme

Den Schwerpunkt dieser Dissertation stellt die Entwicklung sowohl eines Beschreibungs- als auch eines Erklärungsmodells zur Darstellung und Bestimmung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen unter Berücksichtigung der dabei anfallenden Kosten in einer Produktion mit Hybridfertigung dar. Die Realisierung erfolgt aufbauend auf den Erkenntnissen und Grundlagen zur Modellierung logistischer Systeme, welche im folgenden Kapitel erarbeitet werden. Ebenso werden im Unterkapitel 3.5 die Grundlagen zur Simulation von Produktionssystemen, welche im Zuge der Umsetzung der theoretisch erarbeiteten Modelle in der Gießerei einer Kupferhütte zum Einsatz kommt, erläutert.

### 3.5.1 Begriffe und Grundlagen der Modellierung

Nachfolgend werden die grundlegenden Begriffe und Aspekte zur Modellierung logistischer Systeme vorgestellt. Zunächst wird der Modellbegriff diskutiert und der Prozess der Modellierung erläutert. Im Anschluss daran wird ein Überblick über die verschiedenen Arten von Modellen gegeben und die Grenzen der Modellierung werden aufgezeigt. Es folgt die Diskussion bezüglich der Zielsetzungen und Anforderungen an die Modellierung zur Bestimmung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf logistische Zielgrößen. Den Abschluss dieses Unterkapitels bildet die Nutzenbetrachtung der Modellierung im Hinblick auf die Planung und Steuerung logistischer Systeme.

#### 3.5.1.1 Der Modellbegriff

Ein Modell stellt ein vereinfachtes Bild der Realität dar, welches zum besseren Verständnis und zur gezielten Beeinflussung eines realen Systems, wie es beispielsweise eine Unternehmung darstellt, dienen soll. Dabei bildet ein Modell ein System oder Subsystem ab und stellt somit einen künstlichen Ausschnitt eines zu beschreibenden Systems dar.<sup>436</sup> Ein Modell ist ein Abbild, eine Repräsentation natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wie Modelle sein können. Ein Modell erfasst dabei prinzipiell nicht alle Attribute und Eigenschaften des Originals, sondern nur diejenigen die für die Anwendung relevant und nützlich erscheinen (siehe dazu Abbildung 46).<sup>437</sup>

---

<sup>436</sup> Vgl. Zsifkovits et al. (2007), S. 60.

<sup>437</sup> Vgl. Stachowiak (1973), S. 131.

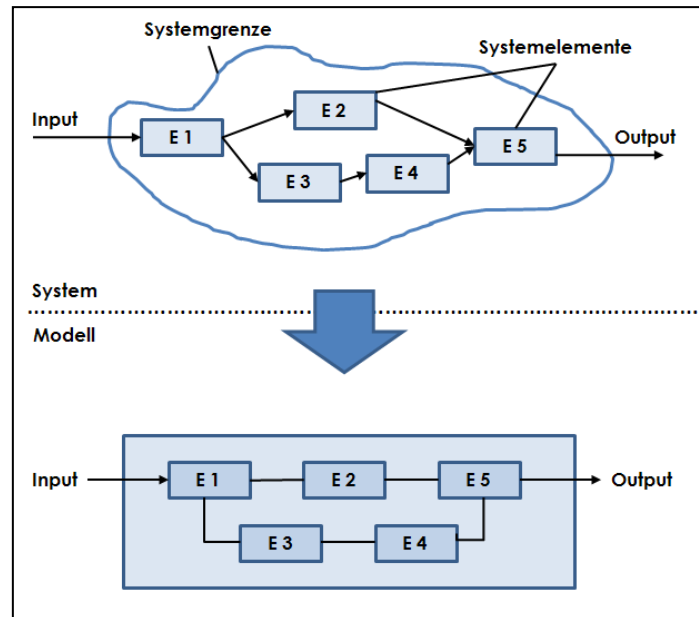


Abbildung 46: Modell als abstrahierte Abbildung eines Systems<sup>438</sup>

Modellen kommt sowohl in technischen als auch wissenschaftlichen Erkenntnisprozessen eine große Bedeutung zu. Sowohl bei der Untersuchung realer Gegenstände und Prozesse in den verschiedensten Bereichen als auch beim Aufbau wissenschaftlicher Theorien weisen Modelle eine entscheidende Erkenntnisfunktion auf. Entsprechend werden Modelle in den unterschiedlichsten Wissenschaftsdisziplinen wie beispielsweise in den Ingenieurwissenschaften als physikalische Versuchsmodelle oder in der Wirtschaftsinformatik zur Modellierung von Unternehmensstrukturen, Netzwerken und Prozessen eingesetzt.<sup>439</sup> In der Literatur existiert eine Vielzahl von Definitionen zum Modellbegriff<sup>440</sup>, wobei die im Nachfolgenden angeführte Definition von Stachowiak keiner bestimmten Fachdisziplin zugeordnet wird und daher als allgemein gültige Definition angesehen wird.<sup>441</sup>

Stachowiak, welcher 1973 die Allgemeine Modelltheorie begründete, definiert ein Modell wie folgt: „X ist ein Modell des Originals Y für den Verwender K in der Zeitspanne t mit der Intention Z.“<sup>442</sup>

Brocke<sup>443</sup> hingegen definiert ein Modell als „das Ergebnis eines Konstruktionsprozesses, bei dem die Wahrnehmung von Inhalten eines ausgewählten Gegenstandes zweckorientiert repräsentiert wird.“ Der Autor unterscheidet dabei zwischen dem *abbildungsorientierten* und *konstruktionsorientierten Modellbegriff*. Unter dem *abbildungsorientierte Modellbegriff* versteht man die Interpretation der Modelle als abstrakte Abbilder der Realität für gezielte Zwecke eines Verwenders. Der *konstruktionsorientierte Modellbegriff* umfasst das Modell als Ergebnis der Konstruktion eines Modellierers. Modelle von logistischen Systemen besitzen diese

<sup>438</sup> In Anlehnung an Kühn (2006), S. 28.

<sup>439</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 29.

<sup>440</sup> Siehe ausführlich dazu Schütte (1998), S. 45 ff.

<sup>441</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 28.

<sup>442</sup> Stachowiak (1973), S. 132.

<sup>443</sup> Vgl. Brocke (2003), S. 19 ff.



Merkmale und verbinden im Allgemeinen die abbildungsorientierte und konstruktionsorientierte Sichtweise.<sup>444</sup>

Nach Stachowiak lassen sich Modelle anhand drei konstituierender Merkmale - dem *Abbildungsmerkmal*, dem *Verkürzungsmerkmal* und dem *pragmatischen Merkmal* - klassifizieren:<sup>445</sup>

Das *Abbildungsmerkmal* kennzeichnet die Relation (Abbildungsrelation) eines Modells zu seinem abzubildenden Original.

Modelle sind eine Vereinfachung der Realität, da diese das Original verkürzen (abstrahieren) und damit nur Teile dessen darstellen. Diese Tatsache wird durch das *Verkürzungsmerkmal* beschrieben.

Da Modelle ihren Originalen nicht eindeutig zugeordnet sind, erfüllen diese eine Ersetzungsfunktion. Anhand des *pragmatischen Merkmals* hinsichtlich Zeitlichkeit, Intentionalität und Subjektivität kann eine Klassifizierung dieser erfolgen.

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Merkmalen spielt die Validität, d.h. die Gültigkeit eines Modells eine entscheidende Rolle, da andernfalls die Wirklichkeit nicht entsprechend abgebildet und somit die Ergebnisse ungültig und unbrauchbar wären.<sup>446</sup>

Modelle helfen durch Abstraktion und Idealisierung reale Eigenschaften, Beziehungen und Zusammenhänge fassbar und praktisch nutzbar zu machen, um damit umfassende Erkenntnisse über die Wirklichkeit erzielen zu können.<sup>447</sup>

Um nun ein System, seine Elemente und die darin herrschenden Wechselwirkungen abbilden zu können, muss zunächst das Verhalten des abzubildenden Systems analysiert werden. Darauf aufbauend kann der Prozess der Modellbildung erfolgen.

### 3.5.1.2 Entwicklung von Modellen

Bevor mit der Modellierung eines logistischen Systems begonnen werden kann, muss wie bereits erwähnt das Verhalten des abzubildenden Systems und seiner Komponenten analysiert werden. Dazu bedient man sich der Systemanalyse, welche ein Teilgebiet der Systemtheorie<sup>448</sup> darstellt.

Die Modellierung eines technischen Systems kann je nach Einsatzzweck und Blickwinkel stark variieren. Für das Verständnis des Systemmodells ist es daher notwendig sich des Modellcharakters bewusst zu sein. Denken in Modellen stellt eine Kerndimension des systematischen

<sup>444</sup> Vgl. Zsifkovits et al. (2008), S. 61.

<sup>445</sup> Vgl. Stachowiak (1973), S. 132 ff.

<sup>446</sup> Vgl. Zsifkovits et al. (2007), S. 63.

<sup>447</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 28.

<sup>448</sup> Zur Systemtheorie siehe auch Abschnitt 3.2.2.

Denkens dar, insbesondere impliziert es, dass die Modellannahmen und die damit zusammenhängenden Grenzen der Modellbildung bewusst reflektiert werden.<sup>449</sup>

### **Systemanalyse:**<sup>450</sup>

Die Systemanalyse dient der Ermittlung der externen und internen Systemfunktionalitäten und -zusammenhänge. Beim [...] „systembezogenen Denken geht es darum, den zu lösenden Problemkreis als ein System mit seinen Elementen und Interaktionen sowohl innerhalb des Systems, als auch mit den Umsystemen, d.h. der Außenwelt des Systems, zu verstehen.“<sup>451</sup> Die Vorgehensweise der Systemanalyse basiert auf der vorliegenden Problematik und kann entweder einen Top-down- oder einen Bottom-up-Ansatz verfolgen. Der Top-down-Ansatz geht von der Grobplanung aus und bildet mit zunehmendem Fortschritt der Planung das Gesamtsystem mit wachsendem Detaillierungsgrad ab. Beim Bottom-up-Ansatz werden einzelne Teilbereiche des Systems detailliert modelliert und erst später im Verlauf der Entwicklung zu größeren Modellgruppen zusammengefasst, bis schließlich eine Abbildung des Gesamtsystems erreicht wird.<sup>452</sup> Die Top-down-Methode ist ein integraler Ansatz, während die Bottom-up-Methode einen Ansatz zur Lösung von Teilproblemen darstellt. Die Vorteile der Top-down-Methode liegen vor allem in der Übersichtlichkeit beim Aufbau komplexer Systeme und im einfacheren Auffinden von Systemalternativen. Jedoch der hohe Planungsaufwand und der vergleichbar geringe Nutzen zu Planungsbeginn sowie der große Modellumfang sprechen gegen diesen Ansatz.<sup>453</sup> Als Vorteile der Bottom-up-Methode sind die Möglichkeiten der Benützung vorgefertigter Strukturen, die von Beginn an mögliche, systemnahe Darstellung sowie die frühzeitige Möglichkeit der Verifikation und Validierung von Teilsystemen wie auch das Durchführen detaillierter Analysen zu nennen. Dem gegenüber stehen ein mangelndes Verständnis für das Gesamtsystem sowie mögliche Schwierigkeiten, welche sich bei der Zusammenfassung von existierenden Teilstrukturen ergeben können.<sup>454</sup> In der Praxis bedient man sich daher meist eines iterativen Ansatzes.

Zur Systemanalyse und Strukturierung empfiehlt sich eine methodische Vorgehensweise, welche die *Systemabgrenzung*, die *Analyse des Systemzwecks* und der *globalen Systemeigenschaften*, die *Untersuchung der Systemstruktur*, die *Analyse der einzelnen Systemelemente* sowie die *Wirkungsanalyse* und *Analyse der Ablaufstruktur* beinhaltet:<sup>455</sup>

#### a. *Systemabgrenzung:*

Durch die Systemabgrenzung wird das System klar von der Umgebung (Umwelt) freigeschnitten und somit der Umfang der Untersuchung definiert. Dabei erfolgt die Fest-

<sup>449</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 31.

<sup>450</sup> Siehe dazu 3.2.4 Charakterisierung von Produktionssystemen mit Hybridfertigung.

<sup>451</sup> Schönsleben, Paul (2007), S. 943.

<sup>452</sup> Vgl. Harrington et al. (2000), S. 134 f.

<sup>453</sup> Vgl. Schönsleben (2007), S. 943.

<sup>454</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 40.

<sup>455</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 41 ff.

legung der Systemgrenzen, das Freischneiden des Systems, die Untersuchung der Schnittstellen für den Material-, Energie- und Informationsfluss zwischen dem System und der Umgebung und die Definition der materiellen, energetischen und informationstechnischen Ein- und Ausgangsgrößen des Systems. Mit diesem Schritt wird festgestellt, was zu modellieren ist und welche Schnittstellen nach außen hin (zur Umgebung) zu berücksichtigen sind.

*b. Analyse des Systemzwecks und der globalen Systemeigenschaften:*

Im zweiten Analyseschritt werden der Systemzweck sowie die globalen Systemeigenschaften auf der Makroebene, d.h. des Systems als Ganzes untersucht. Verhalten und Struktur auf der Mikroebene, d.h. Details innerhalb des Systems werden noch nicht berücksichtigt. Dabei wird das System als Black-Box betrachtet sowie die Analyse des Systemzwecks und die Untersuchung des Input-/Output-Verhaltens vorgenommen. Mit der Analyse des Input/Output-Verhaltens können sowohl die Analyse des tatsächlichen Verhaltens des Systems wie auch die Definition der Anforderungen an das Verhalten eines zukünftigen Systems gemeint sein.

*c. Untersuchung der Systemstruktur:*

Diese Analyse betrifft die Struktur auf der Mikroebene innerhalb eines Systems. Ziel dieses Schrittes ist es, festzustellen, welche Elemente und Verbindungen eines Systems wesentlich sind, um eine klare Struktur des Systems herauszuarbeiten. Die Analyse der Systemstruktur umfasst somit die hierarchische Gliederung des Systems (vertikal) sowie die Strukturierung der einzelnen Bereiche (horizontal). Ebenfalls erfolgen hierbei die Definition der einzelnen Komponenten und die Definition der Verbindungen zwischen diesen auf den verschiedenen Ebenen.

*d. Analyse der einzelnen Systemelemente:*

Auf Basis der im vorherigen Schritt ermittelten Systemstruktur sind nun die einzelnen Systemelemente dieser Struktur genauer zu untersuchen und zu spezifizieren. Dabei erfolgen die Definition der Eigenschaften der Komponenten und die Ermittlung der jeweiligen Systemparameter. Das Ergebnis dieses Schrittes ist die klare Definition der einzelnen Systemelemente.

*e. Wirkungsanalyse und Analyse der Ablaufstruktur:*

Die Wirkungsanalyse hat zum Ziel, die Vernetzungen in einem System in Beziehungen der Systemelemente untereinander aufzulösen. Dabei wird die Beeinflussung eines Systemelements durch ein anderes als Wirkung bezeichnet. Ein komplexes Beziehungsgeflecht lässt sich in einzelne Wirkungen zerlegen, welche jeweils ein Systemelement mit einem anderen verknüpfen. Einzelne Wirkungen können sich wiederum zu langen Ket-

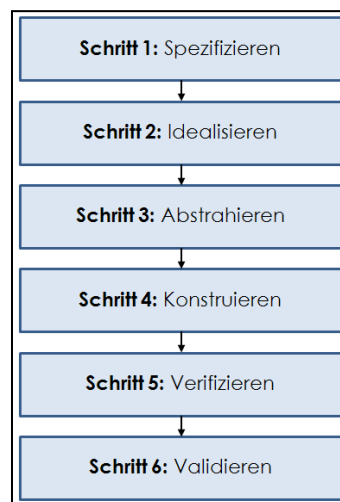
ten mit einem definierten Anfang und Ende oder zu einem Kreis zusammenschließen. Diese können sich überlagern und bestimmen so die Dynamik des Systems. Auf Basis der definierten Systemstruktur und ihrer Elemente sind die internen Prozesse auf der Mikroebene des Systems zu untersuchen und zu spezifizieren. Die Analyse der Ablaufstruktur umfasst dabei die Untersuchung der im System ablaufenden Prozesse und deren Strukturierung sowie die Ermittlung der Transformationsfunktionen der Eingangs- und Ausgangsgrößen und die Bestimmung der Ablauflogik. Als Ergebnis dieses Schrittes erhält man die klare Definition der Prozesse und der dahinter stehenden Logik.

Die Modellbildung kann je nach Anforderung sowohl qualitativ, zur Ermittlung der Art und Richtung von Wirkungszusammenhängen als auch quantitativ, zur Darstellung zahlenmäßiger Zusammenhänge, erfolgen.<sup>456</sup>

### **Modellbildung:**

Die Modellierung umfasst eine Reihe von Tätigkeiten, welche je nach Anwendungsfall unterschiedlich ausgeprägt sein können.<sup>457</sup>

Der Modellbildungsprozess lässt sich im Allgemeinen in sechs Schritte gliedern (siehe dazu Abbildung 47):



**Abbildung 47: Schritte der Modellbildung<sup>458</sup>**

Den ersten Schritt stellt die *Spezifizierung* des abzubildenden Objektes (z.B. eines Produktionssystems) dar. Dabei erfolgen die Benennung, Symbolisierung und Beschreibung der sich im Objekt befindlichen Systemelemente und deren Beziehungen. Darauf aufbauend hat die *Idealisierung*, d.h. die darzustellenden Objekte werden auf „ideale“ Eigenschaften reduziert und unwesentliche Aspekte vernachlässigt, zu erfolgen. Den nächsten Schritt stellt die *Abstrahierung* dar, worunter man das Zusammenfassen von Objekten gleicher Eigenschaften zu einem neuen (abstrakten) Objekt versteht. Dies kann beispielsweise die Zusammenfassung

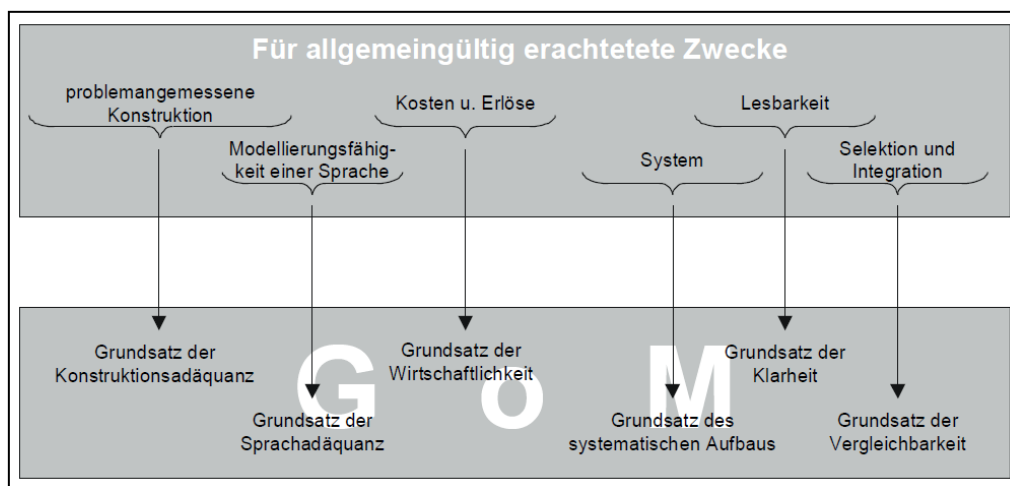
<sup>456</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 31.

<sup>457</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 32 ff.

<sup>458</sup> In Anlehnung an Kühn (2006), S. 32.

mehrerer Aggregate gleichen Typs zu einem Ersatzaggregat sein. Schritt vier beinhaltet das *Konstruieren*, bei welchem die Zusammensetzung von Zeichen (Notationen) entsprechend einer Syntax erfolgt. Darauf aufbauend geschieht die *Verifizierung*, d.h. die Überprüfung der Übereinstimmung eines Konzeptes und des daraus entwickelten Modells. Den Abschluss bildet die *Validierung*. Dabei wird das Modell hinsichtlich seiner Eignung, bezogen auf den Einsatzzweck überprüft.<sup>459</sup>

Die Modellierung führt nur dann zu brauchbaren und realistischen Ergebnissen, wenn diese nach den in Abbildung 48 dargestellten *Grundsätzen ordnungsmäßiger Modellierung*<sup>460</sup> (GoM), welche die Erstellung von Modellen in Bezug auf Klarheit, Konsistenzsicherung und Qualität unterstützen, erfolgt, auf welche nun im Folgenden kurz eingegangen wird:<sup>461 462 463</sup>



**Abbildung 48: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung (GoM)<sup>464</sup>**

*Grundsatz der Richtigkeit:* Der Grundsatz der Richtigkeit fordert, dass die Repräsentation der Realwelt in einem Modell dieser in wesentlichen Zügen entspricht.

*Grundsatz der Relevanz:* Der Grundsatz der Relevanz impliziert, dass die für den Modellierungszweck relevanten Tatbestände ihren Niederschlag im Modell finden. Für die intendierten Zwecke des Modells ist es nicht notwendig, dass ein Modell vollständig ist, da ein Modell, verglichen mit der Realwelt, niemals vollständig sein kann.

*Grundsatz der Wirtschaftlichkeit:* Der Grundsatz der Wirtschaftlichkeit gibt an, dass immer dann ein optimaler Detaillierungsgrad der Modelle gefunden ist, wenn die Grenzkosten einer weiteren Informationsmodellierung (steigende Grenzkosten unterstellt)

<sup>459</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 32.

<sup>460</sup> Siehe umfassend Becker et al. (1995), S. 435 ff.

<sup>461</sup> Vgl. Becker et al. (1997), S. 18 ff.

<sup>462</sup> Vgl. Becker (1998), S. 3 ff.

<sup>463</sup> Vgl. Schütte (1997), S. 4 ff.

<sup>464</sup> Becker (1998), S. 3.

gerade dem Grenznutzen einer weiteren Detaillierung (abnehmender Grenznutzen bei weiterer Modellierung unterstellt) entsprechen.

*Grundsatz der Klarheit:* Der Grundsatz der Klarheit postuliert Lesbarkeit, Verständlichkeit und bestmögliche Anschaulichkeit von Modellen. Dieser fordert, dass Modelle so einfach wie möglich und so kompliziert wie nötig sind. Dies wiederum impliziert, dass das Modell nur so viele Elemente enthalten soll, als zum Verständnis und zur Wiedergabe der Intention notwendig sind.

*Grundsatz der Vergleichbarkeit:* Der Grundsatz der Vergleichbarkeit zielt darauf ab, dass Modelle, welche mit verschiedenen Modellierungsverfahren erstellt worden sind, miteinander verglichen werden können. Um die Überführung eines Modells in ein anderes zu ermöglichen bedient man sich des Einsatzes von so genannten Beziehungs-*metamodellen* oder computer-gestützten Verfahren.

*Grundsatz des systematischen Aufbaus:* Dieser Grundsatz baut darauf auf, dass bei der Modellierung eine sichtübergreifende Konsistenz hergestellt wird, d.h. dass die unterschiedlichen Sichtweisen (z.B. Organisationssicht, Datensicht, Funktionssicht) den notwendigen Zusammenhang aufweisen.

Ebenso basieren die Vereinfachungen von Modellen auf bestimmten Annahmen, wie beispielsweise *Stabilitätsannahmen*, *Reproduzierbarkeitsannahmen*, *Gleichverteilungsannahmen*, *Linearitätsannahmen* und *Gleichgewichtsannahmen*. Inwieweit ein Modell für den jeweiligen Einsatzfall geeignet ist, wird neben der Ausführung der Modellierung im Wesentlichen davon bestimmt, wie passend die Modellannahmen zu der zu beantwortenden Fragestellung getroffen werden.<sup>465</sup>

*Stabilitätsannahmen:*

Bei der Modellierung wird vereinfachend davon ausgegangen, dass anstelle eines dynamischen Systemverhaltens ein statisches Verhalten angenommen werden kann. Dies erleichtert zwar die Modellierung erheblich, impliziert aber auch, dass es im Laufe der Zeit zu keinen erheblichen Schwankungen kommen wird.

*Reproduzierbarkeitsannahmen:*

Mit dieser Annahme wird vorausgesetzt, dass das Systemverhalten reproduzierbar und nicht von zufälligen Faktoren abhängig ist. Parameter, die in der Realität durchaus variieren können, werden im Zuge der Modellerstellung als deterministische Werte mo-

---

<sup>465</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 38.

delliert. Obwohl dadurch die Modellierung und Auswertung komplexer Systeme wesentlich vereinfacht werden kann, ist zu prüfen, ob die Dynamik des Systems damit hinreichend gut abgebildet wird.

*Gleichverteilungsannahmen:*

Der Gleichverteilungsannahme liegt zugrunde, dass sich ein System grundsätzlich im Gleichgewicht befindet bzw. einem Gleichgewicht zustrebt. Gerade in wirtschaftlichen und ökologischen Modellen wird diese Annahme gerne getroffen, da damit in der Regel sehr einfach aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können. Berücksichtigung hat jedoch die Tatsache zu finden, dass Ungleichgewichten als Kräfte in der Wirtschaft und Ökonomie erhebliche Bedeutung zugebracht werden muss.

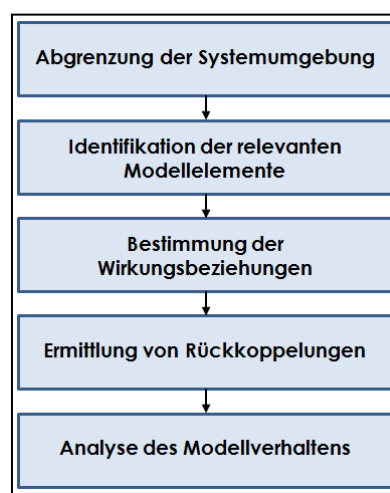
*Linearitätsannahmen:*

Linearitätsannahmen gehen vereinfachend davon aus, dass sich eine Variable linear zur Eingangsgröße verhält.

*Gleichgewichtsannahmen:*

Dabei wird angenommen, dass bestimmte Eigenschaften eines Systems gleichverteilt vorliegen.

Die Modellierung von Systemen selbst kann, wie bereits erwähnt, qualitativ oder quantitativ erfolgen. Die qualitative Modellierung von Systemen hat das Ziel, die im System (und auch mit seiner Umgebung) herrschenden Wirkungsbeziehungen zu beschreiben. Dazu sind die folgenden Schritte (siehe dazu Abbildung 49) der Systemmodellierung notwendig.<sup>466 467</sup>



**Abbildung 49: Schritte der qualitativen Modellierung von Systemen<sup>468</sup>**

<sup>466</sup> Vgl. Schwarz (2002), S. 153 ff.

<sup>467</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 33 f.

<sup>468</sup> In Anlehnung an Kühn (2006), S. 32.

**Schritt 1: Abgrenzung der Systemumgebung**

Den ersten Schritt der qualitativen Modellierung eines Systems stellt die Abgrenzung dessen von seiner Umgebung (Umwelt) und somit die Festlegung des relevanten Betrachtungsbereiches dar.<sup>469</sup>

**Schritt 2: Identifikation der relevanten Modellelemente**

Im zweiten Schritt erfolgt die Identifizierung der relevanten Modellelemente. Dieser Schritt setzt die Fähigkeit der Konzentration auf die wesentlichen Komponenten, Funktionen und Beziehungen voraus. Sowohl bei qualitativen als auch bei quantitativen Systemmodellen ist es sinnvoll, zunächst mit einem Grundmodell, welches nur wenige Elemente enthält, zu beginnen, um darauf aufbauend die Modellierung mit steigendem Detaillierungsgrad fortzusetzen. Im Zuge dessen erfolgt die Fokussierung des Modellierungszwecks, wobei durch die Auswahl der Modellelemente das zentrale Anliegen des Modells festgelegt wird.

**Schritt 3: Bestimmung der Wirkungsbeziehungen**

Sind die wesentlichen Modellelemente erfasst, können die kausalen Wirkungsbeziehungen zwischen diesen Elementen identifiziert werden. Dabei wird u.a. zwischen proportionalen oder quadratischen Zusammenhängen sowie zwischen umgekehrt proportionalen, umgekehrt quadratischen oder indifferenten (weisen keine klare Richtung auf) Wirkungen unterschieden. Eine weitere wesentliche Differenzierung kann im Zeitverhalten erfolgen. Dabei können Wirkungen einem kurz-, mittel- oder langfristigen Charakter unterliegen. Den Abschluss bildet die grafische Umsetzung der ermittelten Wirkungsbeziehungen beispielweise in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm.

**Schritt 4: Ermittlung von Rückkoppelungen**

Nachdem die Wechselwirkungen ermittelt worden sind, kann die Identifizierung der Rückkopplungskreise erfolgen. Hierbei wird festgestellt, welche Rückwirkungsbeziehungen zwei Systemelemente zueinander aufweisen.

**Schritt 5: Analyse des Modellverhaltens**

Abschließend wird versucht, aus der Art der Vernetzungen der Systemelemente im Wirkungsdiagramm Aufschlüsse über das mögliche Modellverhalten zu zeigen. Die Analyse abstrakter Modellstrukturen bietet allerdings nur eine eingeschränkte Sichtweise und daher empfiehlt es sich in der Regel für eine ausführliche Analyse eine quantitative Modellierung mit anschließender Simulation durchzuführen.

Die quantitative (zahlenmäßige) Modellierung von Systemen kann durch Differentialgleichungen für kontinuierliche Systeme, Differenzgleichungen für diskrete Systeme und diskre-

---

<sup>469</sup> Siehe dazu ausführlich S. 47 ff.



te Simulationsmodelle für regelbasierte diskrete Systeme realisiert werden. Diese Art von Modellen geht von der Kenntnis über die internen Systemzusammenhänge aus, ermittelt die Wirkungsstruktur und formalisiert dann diese je nach Fragestellung mathematisch. Insbesondere diskrete Simulationsmodelle und Differentialgleichungen finden in den verschiedensten Disziplinen Einsatz.<sup>470</sup>

Einen grundsätzlich anderen Ansatz zur Modellierung dynamischer Systeme verfolgen die datenbasierten Methoden. Dabei wird nicht vom Wissen über interne Systemzusammenhänge auf der Mikroebene ausgegangen, sondern es erfolgt die Auswertung externer Daten oder die Beobachtung auf der Makroebene, um daraus Zusammenhänge zu erkennen. Diese Verfahren kommen dann vermehrt zum Einsatz, wenn sich Wirkungszusammenhänge nicht a priori ableiten lassen.<sup>471</sup>

An der Schnittstelle zwischen dem qualitativem und quantitativem Ansatz steht das Quantifizieren bzw. Messen. Dies beinhaltet Regeln und Verfahren, wie aus qualitativen Zuständen Zahlen generiert werden können.<sup>472</sup>

Bei quantitativen Modellen ist generell zwischen Zustandsgrößen, Zustandsänderungen und Flussgrößen zu unterscheiden. Bezüglich der zeitlichen Abgrenzung ist die Unterscheidung zwischen zeitpunktbezogenen (wie beispielsweise der Lagerbestand eines Unternehmens) und zeitintervallbezogenen (z.B. Lagerzu- und -abgänge) Größen zu treffen. Die Zustandsgrößen bilden das Gerüst jedes systemdynamischen Modells und können mittels zeitintervallbezogener Größen verändert werden. Zeitintervallbezogene Größen werden in der Regel in Form einer abgeleiteten Messung durch die Differenzbildung zwischen zwei Zustandsgrößen als Zustandsänderung ermittelt. Bei zeitintervallbezogenen Größen kann zwischen Veränderungsgrößen (absolute Veränderungen von Zuständen in einem bestimmten Zeitintervall) oder Flussgrößen (relative Veränderungen pro Zeiteinheit) differenziert werden, wobei in systemdynamischen Modellen zeitintervallbezogene Größen grundsätzlich als Flussgrößen modelliert werden. Flussgrößen sind im Vergleich zu Veränderungsgrößen aussagekräftiger, da diese unabhängig von der Wahl der Simulationsschrittweite sind, während sich die Veränderungsgrößen proportional zur Schrittweite ändern.<sup>473</sup>

### 3.5.1.3 Arten von Modellen

Die Gliederung von Modellen kann nach vielfältigen Kriterien erfolgen. Sterman<sup>474</sup> unterscheidet zwischen mentalen Modellen und Computermodellen. Sein Ansatz beruht auf der Software-gestützten Modellierung und lässt dabei den Bereich externalisierter, formalisierter,

---

<sup>470</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 27 ff.

<sup>471</sup> Siehe umfassend Suhl et al. (2009).

<sup>472</sup> Vgl. Rezagholi (2004), S. 55 ff.

<sup>473</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 35 ff.

<sup>474</sup> Vgl. Sterman (1991), S. 209 ff.

aber nicht am Computer implementierter Modelle außer Acht. Dieser fokussiert die Gliederung in Optimierungsmodelle und Simulationsmodelle, wobei hier kritisch anzumerken ist, dass diese Einteilung den eigentlichen Zweck der Modellierung - das Aufzeigen, Beschreiben und Erklären von Wirkungszusammenhängen in Systemen - missachtet und eher den Zweck der weiterführenden Analyse und Optimierung auf Basis der erstellten Modelle sieht.<sup>475</sup>

Eine anerkannte und weit verbreitete Klassifikation von Modellen stammt von Stachowiak, bei welchem die Gliederung in graphische, technische und semantische Modelle erfolgt:<sup>476</sup>

*Graphische Modelle* umfassen sowohl Bildmodelle (Abbildungen, Bilder, schematische Abbildungen) als auch Darstellungsmodelle in Form von Diagrammen und Graphen.

*Technische Modelle* lassen sich in Abhängigkeit vom zugrundeliegenden Wissenschaftsbereich in physiktechnische Modelle wie beispielweise mechanische Modelle, elektrotechnische Modelle, biotechnische, psychotechnische und soziotechnische Modelle unterscheiden.

Bei *semantischen Modellen* erfolgt die Klassifizierung in interne und externe Modelle. Interne Modelle bezeichnen entweder Perzeptionsmodelle (Wahrnehmungssysteme) oder nichtperzeptuelle Modelle als emotionale oder kognitive Modelle. Externe Modelle umfassen Zeichenmodelle wie beispielsweise Kommunikationssysteme.

Eine umfassende Einteilung von betriebswirtschaftlichen Modellen kann nach Adam<sup>477</sup>, Witte<sup>478</sup>, Pfohl und Stölze<sup>479</sup> in Abhängigkeit von der zugrundeliegenden *Entscheidungssituation*, vom *Entscheidungszweck* sowie den *verfügbaren Informationen* erfolgen.

Abhängig vom Einsatzzweck kann dabei zwischen *Beschreibungsmodellen*, *Erklärungs- oder Kausalmodellen*, *Prognosemodellen*, *Simulationsmodellen*, *bedientheoretischen Modellen* und *Entscheidungs- bzw. Optimierungsmodellen* unterschieden werden:<sup>480</sup>

*Beschreibungsmodelle* dienen lediglich zur Darstellung der Elemente eines Systems und deren Beziehungen in realen Systemen. Ebenso bilden diese Abhängigkeiten zwischen Funktions-, Struktur- und Verhaltensähnlichkeiten ab und/oder stellen die Wechselbeziehungen zwischen Handlungsalternativen und den daraus resultierenden Ergebnissen dar.<sup>481</sup>

*Erklärungs- oder Kausalmodelle* (auch Wirkmodelle genannt) haben die Untersuchung der Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen unabhängigen exogenen Parametern und davon abhängigen Variablen (bzw. Zielgrößen) zum Inhalt. Erklärungs- oder Kausalmodelle ha-

<sup>475</sup> Vgl. Zsifkovits et al. (2007), S. 61.

<sup>476</sup> Vgl. Stachowiak (1973), S. 132 ff.

<sup>477</sup> Siehe dazu Adam (1996), Abschnitt 1.4.

<sup>478</sup> Siehe dazu Adam et al. (1976), S. 1 ff.

<sup>479</sup> Siehe dazu Pfohl et al. (1997), S. 52 ff.

<sup>480</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-2.

<sup>481</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 8.

ben ihre Berechtigung in der Erklärung von Systemverhalten bzw. dienen als Basis zur Formulierung von Verhaltenshypothesen.<sup>482</sup>

*Prognosemodelle* finden ihren Einsatz entweder in der Entwicklungsprognose, bei welcher die Vorhersage zukünftiger Daten erfolgt, und/oder in der Wirkungsprognose, welche zur Abschätzung der Konsequenzen von Handlungsalternativen dient.<sup>483</sup>

Als *Simulationsmodelle* bezeichnet man spezielle Prognosemodelle, welche in komplexen Systemen, in denen Wirkungsrelationen nicht bzw. nur sehr schwierig analytisch ermittelbar sind und deren Verhalten häufig zufälligen Einflüssen unterliegen, Anwendung finden. Mit Hilfe von Simulationsmodellen lassen sich die Auswirkungen verschiedener Handlungsalternativen (Konfigurationen) auf das Systemverhalten untersuchen, ohne diese tatsächlich realisieren zu müssen. Diesen Vorteil macht sich auch die Autorin im Zuge der Verifizierung und Validierung der entwickelten Modelle und Vorgehensweise (siehe dazu Kapitel 5) durch die Erstellung eines Simulationsmodells zu Nutzen.<sup>484</sup>

*Bedientheoretische Modelle* oder auch Warteschlangenmodelle<sup>485</sup> genannt, sind wie Simulationsmodelle, spezielle Prognosemodelle, die prinzipiell denselben Verwendungszweck wie Simulationen aufweisen. Bedientheoretische Modelle beschäftigen sich mit den Auswirkungen von stochastischen Anforderungen auf den Warte-, Abfertigungs- und Abgangsprozess an einer Ressource. Diese werden sowohl bei der Planung von Logistiksystemen als auch bei der Parameteroptimierung derer eingesetzt.<sup>486</sup>

*Entscheidungs- bzw. Optimierungsmodelle*<sup>487</sup> enthalten neben der Abbildung und Erklärung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen auch sogenannte Zielfunktionen zur Auswahl und Bewertung von Handlungsmöglichkeiten. Eine Zielfunktion (auch als Qualitätsfunktion oder Fitnessfunktion bezeichnet), stellt eine Funktion aus einer oder mehrerer veränderlichen Variablen dar. Aus der Definitionsmenge, d.h. der Menge aller möglichen Werte der Veränderlichen, soll jene Kombination der Variablen ermittelt werden bei der sich ein Maximal- oder Minimalwert der Zielfunktion ergibt. Diese Kombination der Veränderlichen wird dann als Optimum bezeichnet, wobei die Definition der Zielfunktion (Minimierung/Maximierung) vom jeweiligen zugrundeliegenden Problem abhängig ist.<sup>488</sup> Ein Entscheidungsmodell bezeichnet die formale Darstellung eines Entscheidungsproblems, bei dem die im Hinblick auf das angestrebte Ziel bzw. den zu erreichenden Soll-Zustand best mögliche Lösung auszuwählen ist.<sup>489</sup> *Entscheidungsmodelle* erleichtern somit die Bestimmung optimaler Handlungsmöglichkeiten

---

<sup>482</sup> Vgl. Nyhuis (2008), S. 8.

<sup>483</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-2.

<sup>484</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 99 ff.

<sup>485</sup> Siehe umfassend zur Warteschlangentheorie und -modelle Tempelmeier et al. (1993).

<sup>486</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-2 f.

<sup>487</sup> Siehe umfassen Suhl et al. (2009).

<sup>488</sup> Vgl. Domschke et al (1997), S. 292 f.

<sup>489</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-2 f.

durch Übertragung der in einem Erklärungsmodell gewonnenen Erkenntnisse auf einen praktischen Anwendungsbereich.<sup>490</sup>

Nach der Art der zur Verfügung stehenden Informationen lassen sich Modelle in *quantitative (mathematische) Modelle* und *qualitative Modelle* unterteilen:<sup>491 492</sup>

In *quantitativen (mathematischen) Modellen* beruhen alle im Modell abgebildeten Aspekte eines realen Entscheidungsproblems auf kardinal messbaren (metrischen) Informationen<sup>493</sup>. Mittels Daten(parameters) und Variablen werden die Elemente eines realen Systems abgebildet und durch Gleichungen und Ungleichungen in strukturhaltender Weise miteinander verknüpft. Durch die Anwendung mathematischer Methoden und Verfahren des Operations Research lassen sich diese Modelle auswerten bzw. lösen.

Im Gegensatz dazu erfolgen in *qualitativen Modellen* die Darstellung von quantitativen Zusammenhängen und/oder verbalen Problembeschreibungen auf Basis von ordinal oder nominal messbaren Informationen<sup>494</sup>. Diese beruhen häufig auf subjektiven Einschätzungen und sind daher meist auf die Darstellung grundlegender Zusammenhänge und Tendenzen beschränkt. Um diese formal auswerten zu können, hat in der Regel die Quantifizierung der qualitativen Informationen zu erfolgen. Dabei müssen gegebenenfalls nicht zum Vergleich geeignete Merkmalsausprägungen künstlich in eine Rangfolge mit fest definierten Abständen gebracht werden. Daher sind die durch die Anwendung eines qualitativen Modells erhaltenen Ergebnisse stets kritisch zu hinterfragen.

Nach der Art der Abstraktion kann zwischen *deterministischen* und *stochastischen Modellen*, *statischen* und *dynamischen Modellen* sowie zwischen *Partial-* und *Totalmodellen* differenziert werden:<sup>495 496 497</sup>

Ein *deterministisches Modell* liegt vor, wenn alle diesem Modell zugrundeliegenden Informationen bekannt sind. Lassen sich die Ausprägungen relevanter Daten lediglich unter Zuhilfenahme von Zufallsvariablen abbilden bzw. sind diese unsicher, dann spricht man von einem *stochastischen Modell*.

*Statische* und *dynamische Modelle* unterscheiden sich hinsichtlich dem Zeitablauf und der damit verbundenen Veränderung ihrer Daten voneinander. Abstrahiert man den Zeitablauf und die dynamische Veränderung der Daten, so erhält man ein statisches Modell. Dynamische Modelle hingegen berücksichtigen den Zeitaspekt.

---

<sup>490</sup> Vgl. Schiemenz et al. (2005), S.52.

<sup>491</sup> Vgl. Domschke et al. (2005), S. 32 ff.

<sup>492</sup> Siehe dazu auch S. 120 ff.

<sup>493</sup> Siehe umfassend zu kardinal messbaren Informationen Bamberg/Bauer (2001), Kapitel 2.3.

<sup>494</sup> Siehe umfassend zu ordinal messbaren Informationen Bamberg /Bauer (2001), Kapitel 2.3.

<sup>495</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-3.

<sup>496</sup> Siehe dazu umfassend Schneeweiß (1992)

<sup>497</sup> Siehe dazu umfassend Steven (1994).

Von einem *Totalmodell* spricht man, wenn ein abzubildendes reales System vollständig modelliert wird (z.B. Gesamtunternehmung). Betrachtet man hingegen nur einen bestimmten Ausschnitt eines Realsystems (z.B. eine Abteilung einer Unternehmung) und/oder ist die Modellierung auf eine zeitliche Reichweite begrenzt, so liegt ein *Partialmodell* vor.

Für die Modellierung logistischer Systeme sind die meisten der oben angeführten Ausprägungen denkbar, weshalb eine eindeutige Zuordnung zu einem oder wenigen Modelltypen nicht sinnvoll bzw. realisierbar ist. Die Wahl eines Modelltyps wird im Wesentlichen durch den Modellierungszweck, den individuellen Präferenzen und Kenntnissen des Modellierers sowie der zur Verfügung stehenden Modellierungsunterstützung durch Methoden und Softwarewerkzeuge bestimmt.<sup>498</sup>

Die zu entwickelnden Modelle, mit Hilfe derer der Einfluss und die Auswirkungen der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen abgebildet werden soll, stellen sowohl ein Beschreibungs- als auch ein Erklärungsmodell dar. Realisiert werden diese durch die Ansätze des qualitativen und quantitativen Modellierens. Im Fokus der Modellierung liegt der Verwendungszweck des zu erstellenden Modells, welcher in der Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung gesehen wird. Bevor in 3.5.1.5 die modellgestützte Produktionsplanung und Fertigungssteuerung thematisiert wird, erfolgt zunächst die Betrachtung der Grenzen der Modellierung.

#### 3.5.1.4 Grenzen der Modellierung

Durch die Entwicklung von Modellen und deren Anwendung in einer Simulation lassen sich Systeme und deren miteinander in Beziehung stehenden Elemente darstellen. Mitunter kann das System dadurch besser beherrsch- und steuerbar sein. Beachtung muss jedoch die Tatsache finden, dass der Modellierung von Systemen Grenzen gesetzt sind. Je komplexer ein System in seiner Struktur und seinem Verhalten ist, desto schwieriger ist es, diese Zusammenhänge in einem Modell vollständig abzubilden. In vielen Fällen muss eine Abstraktion in der Abbildungsgenauigkeit vorgenommen werden, um ein System überhaupt abbilden zu können.<sup>499</sup>

Im Folgenden werden nun die Grenzen und Einschränkungen aufgezeigt, welchen Modelle und damit auch die Möglichkeiten ihrer Aussagekraft unterliegen:<sup>500</sup>

1. Durch die notwendige Abstraktion und Fokussierung auf die zu untersuchenden Phänomene in einem komplexen System können auftretende Wechselwirkungen verloren gehen und damit entscheidende Einflussfaktoren unberücksichtigt bleiben. Die Kon-

---

<sup>498</sup> Vgl. Zsifkovits et al. (2007), S. 62.

<sup>499</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 45.

<sup>500</sup> Vgl. Zsifkovits et. al (2007), S. 62 f.

zentration schwächt somit die Aussagekraft der gewünschten Ergebnisse. Um dies zu verhindern bzw. zu minimieren kann man sich des Einsatzes mehrerer Modellvarianten, welche unterschiedliche Annahmen berücksichtigen, bedienen, um so die bestmögliche Annäherung des vereinfachten Modells an das reale System zu erhalten.

2. Die Modellierung der Wirkungszusammenhänge und Eigenschaften komplexer Systeme stellt sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis eine große Herausforderung an den Modellierer dar. So kann es beispielsweise zur Vernachlässigung emergenter Eigenschaften des Systems durch die Reduzierung von Systemelementen, kommen. Dabei weichen die Ergebnisse des Modells entscheidend von den Erscheinungen im Realsystem ab. Die Verifikation und Validierung der Ergebnisse des Modells stellen daher eine notwendige Tatsache im Zuge des Modellierungsprozesses dar und dürfen neben der Fokussierung auf die, für die jeweilige Fragestellung relevanten Bereiche eines Systems, nicht außer Acht gelassen werden.
3. Nichtlineare Zusammenhänge unterschiedlicher Systemparameter sind schwer abzubildende Eigenschaften, welche gerade vermehrt in komplexen Systemen auftreten. Um diese realisieren zu können, bedarf es der Formulierung mathematischer Gleichungen auf Basis einer vollständigen, validen Datenbasis der Systemabläufe und Erfahrung bzw. Zugang zu Erfahrungsträgern solcher Systeme. In der Realität sind diese beiden Gegebenheiten nur begrenzt verfügbar.
4. Während Risiken mit statistischen Methoden wie beispielsweise Wahrscheinlichkeitsverteilungen oder durch Erfahrungswerte abbildbar sind, können zufällig auftretende Vorfälle im System aufgrund fehlender Erwartungswerte selten valide durch statistische Annahmen untermauert werden.

Die Abbildung von komplexen Systemen in vereinfachten Modellen, die aber dennoch den Ansprüchen der Zielorientierung, Validität und Abbildungstreue genügen, bedingt, dass die wesentlichen Systemelemente und Wirkungsbeziehungen abgebildet und damit die Abbildung alternativer Entscheidungen und Strategien sichtbar gemacht werden können.<sup>501</sup> Die Modellierung logistischer Systeme und die daraus aufbauende Simulation von Produktionssystemen (siehe dazu Abschnitt 3.5.3) setzen im Sinne der Verkürzung nach Stachowiak<sup>502</sup> die Simplifizierung der Elemente und ihrer Zusammenhänge und somit die Reduktion des Modells auf die wesentlichen abzubildenden Eigenschaften voraus. Die Entwicklung realitätsnaher Modelle, welche wie bereits erwähnt u.a. in der Produktionsplanung und Fertigungssteuerung vermehrt Einsatz finden, stellt eine große Herausforderung dar. Dennoch kann ein aussage-

---

<sup>501</sup> Vgl. Lödding (2005) in Nyhuis (2008), S. 321.

<sup>502</sup> Vgl. Domschke et al. (2005), S. 23 ff.

kräftiges Modell einen maßgeblichen Beitrag zur Komplexitätsbeherrschung von Systemen leisten.<sup>503</sup>

### 3.5.1.5 Nutzen der Modellierung in der Planung und Steuerung von logistischen Systemen

Die Planung selbst stellt – im Gegensatz zur Improvisation – eine methodische Vorgehensweise zur Analyse vorhandener Problemstellungen bzw. zur Auswahl der bestehen Handlungsalternativen im Bezug auf eine konkrete Problemstellung dar. Aufgabe der planerischen Tätigkeit ist das Auffinden geeigneter Maßnahmen, um den angestrebten Idealzustand bestmöglich zu erreichen. Auslöser für Planungsaktivitäten sind vorhandene oder erwartete Ereignisse bzw. Probleme. Eng verbunden mit der Planung ist die Entscheidungsfindung, da nicht nur am Ende des Planungsprozesses eine Entscheidung für das weitere Vorgehen getroffen werden muss, sondern sich auch schon während des Planungsvorganges Entscheidungssituationen bezüglich der weiteren Vorgehensweise abzeichnen.<sup>504</sup> Eine Möglichkeit zur Unterstützung der Produktionsplanung und auch der Fertigungssteuerung stellt die Modellierung logistischer Systeme dar. Durch die Abbildung von Systemen in vereinfachten Modellen kann ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung der Plan- und Steuerbarkeit von Produktionssystemen erreicht werden. Modelle helfen durch Abstraktion und Idealisierung reale Eigenschaften, Beziehungen und Zusammenhänge fassbar und praktisch nutzbar zu machen, um so umfassende Erkenntnisse über das reale Systemverhalten zu erzielen. Durch die Modellierung logistischer Systeme kann mitunter eine Reduktion bzw. Beherrschung der Komplexität<sup>505</sup> von Systemen erzielt werden.<sup>506</sup>

Die Komplexität<sup>507</sup> eines Systems, welche durch die Anzahl der Systemelemente und deren Relationen zueinander, also der Struktur des Systems, entsteht, wird als strukturelle Komplexität bezeichnet.<sup>508</sup> Diese zeigt sich meist sehr schnell im Modellierungsprozess und eröffnet auch schon währenddessen Ansatzpunkte zur Umgestaltung des Systems. Die wesentlichen Zusammenhänge und Strukturen des jeweils betrachteten Untersuchungsbereichs können durch die Modellierung sichtbar gemacht werden. Im Wesentlichen lassen sich fünf „Strategien“ unterscheiden, welche mitunter helfen, die Komplexität von Modellen zu reduzieren, um somit einen wertvollen Beitrag zum besseren Verständnis und zur verbesserten Steuerbarkeit von Systemen zu leisten:<sup>509</sup>

<sup>503</sup> Vgl. Zsifkovits et al. (2007), S. 63.

<sup>504</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-1 ff.

<sup>505</sup> Siehe umfassend zur Definition von Komplexität, Fricker (1996), S. 163 ff.

<sup>506</sup> Vgl. Zsifkovits et al. (2008), S. 63.

<sup>507</sup> Definition von Komplexität in dieser Arbeit nach Bronner (1991), S. 1121 f.: Der Grad der Komplexität von Systemen wird durch die Anzahl der Systemelemente und ihrer Relationen zueinander bestimmt.

<sup>508</sup> Vgl. Kirchhof (2003), S. 12.

<sup>509</sup> Vgl. Zsifkovits et al. (2008), S. 64.

### 1. Klarer Modellierungszweck:

Die Zielsetzung der Modellbildung ist ein wesentlicher Faktor für die Gestaltung und den Umfang des Modells. Wird der Modellierungszweck zu weit oder unklar gefasst, resultieren daraus in der Regel unübersichtliche, komplizierte Modelle ohne klare Systemgrenzen, welche schwierig einsetzbar sind.

### 2. Gezielte Filterung:

Ein Modell beinhaltet nur eine begrenzte Anzahl an Elementen und Beziehungen. Je komplexer ein System ist, desto gezielter muss die Filterung an Elementen, Beziehungen, Parametern und Zeitdimensionen erfolgen. Dies muss stets in Abstimmung mit dem Modellierungszweck vorgenommen werden, um eine dementsprechende Aussagekraft des Modells zu erhalten.

### 3. Weitestgehende Standardisierung:

Die Standardisierung in Modellen betrifft nicht Normen und Standards für die Durchführung der modellierten Systeme und Prozesse, sondern ausschließlich die standardisierte Vorgehensweise und den Einsatz von vordefinierten Bausteinen in der Modellbildung. Dieser Aspekt wird in der Umsetzung des Vorgehenskonzepts durch die Erstellung eines Simulationsmodells mithilfe vordefinierter Bausteine (siehe dazu Kapitel 5) berücksichtigt.

### 4. Modulbildung und Clusterung:

Die Modularisierung in Modellen definiert in sich abgeschlossene Teilmodelle (Subsysteme), welche über eindeutig definierte Schnittstellen miteinander verknüpft sind. Damit kann ein wesentlicher Beitrag in der Reduktion der Komplexität des Gesamtmodells erzielt werden. Fokussiert muss hierbei die gezielte Definition der Schnittstellen werden. Diese sollen möglichst einfach gehalten werden, die Vernetzung der Subsysteme soll durch eine beschränkte Anzahl an Parameter erfolgen, wobei wesentliche Wirkungsbeziehungen zu berücksichtigen sind. Dieses Vorgehen steht im Gegensatz zum Bestreben, gesamthafte monolithische Modelle, welche eine unüberschaubare Vielzahl und Vielfalt an Relationen besitzen, zu erstellen.

Als Effekte der Modularisierung kann eine Nutzung der Economies of Scale, die Substituierbarkeit von Teilmodellen durch andere oder verbesserte Modelle sowie die Möglichkeit der Arbeitsteilung im Modellierungsprozess mit der Chance zur Spezialisierung angesehen werden.<sup>510</sup>

### 5. Objektorientierung:

Auch in der Modellierung von Systemen soll eine umfassende Objektorientierung<sup>511</sup> erfolgen. Die Konzepte der Klassenbildung von Objekten, der Objektbeziehungen wie Generalisierung, Assoziation, Komposition und Aggregation sowie die Verwendung standardisierter Notationen

<sup>510</sup> Vgl. Zsifkovits et al. (2008), S. 65.

<sup>511</sup> Zu Objektorientierung siehe umfassend Bruegge et al. (2004) und Sommerville (2004).



im Umfeld der Objektorientierung ermöglichen eine effiziente, zielgerichtete Modellbildung. Darüber hinaus sind die dadurch realisierbaren Modelle wesentlich einfacher zu dokumentieren und zu warten.

Durch die Verbesserung in der Planung und damit auch in der Steuerbarkeit von Systemen und der daraus resultierenden Beherrschung der Komplexität in Systemen kann durch die Modellierung eine systematischere Erreichung logistischer Ziele verfolgt werden.<sup>512</sup>

Im Anschluss werden nun die Anforderungen an die Modellierung zur Bestimmung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf logistische Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem diskutiert.

### **3.5.2 Anforderungen an die Modellierung zur Bestimmung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf logistische Zielgrößen**

In diesem Abschnitt erfolgt die Festlegung der Anforderungen und Zielsetzungen an die zu entwickelnden Modelle, mit Hilfe derer der Einfluss und die Auswirkungen der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem dargestellt und die dabei auftretenden Ursache-Wirkungsbeziehungen abgebildet werden können.

Dazu müssen in einem ersten Schritt sowohl die Zielsetzung an das Beschreibungs- als auch an das Erklärungsmodell festgelegt werden:

*Das zu entwickelnde Beschreibungsmodell* dient zunächst zur Darstellung der wesentlichen Elemente und Beziehungen eines hybriden Produktionssystems. Dieses wird auf Basis der in Abschnitt 3.2.4 diskutierten Charakteristika von Produktionssystemen mit Hybridfertigung und den aus Kapitel 4.1 (Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von hybriden Produktionssystemen) gewonnenen Erkenntnissen erstellt.

Die Bewertung bzw. Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgebestimmung und den logistischen Zielgrößen beruht auf den Erkenntnissen aus den Abschnitten 3.3 (Kennlinientheorie) und 4.2 (Auswirkungen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl auf die Logistikleistung und die Logistikkosten einer hybriden Produktion), welche in einem Ursache-Wirkungsmodell Verwendung finden. Durch die Anwendung dessen können die Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Losgrößen- und Reihenfolgealternativen und den daraus resultierenden Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen in Form eines Bewertungsinstrumentariums aufgezeigt bzw. durch den Einsatz mathematischer Faktoren ermittelt werden. Gleichzeitig erfolgt hierbei die Untersuchung bzw. Erläuterung der Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen der Wahl der Produktionslosgröße und Reihenfolge und der daraus resultierenden Auswirkungen auf die Produktionskosten. Mit Hilfe des Ursache-

---

<sup>512</sup> Vgl. Lödding (2005) in Nyhuis (2008), S. 220.

Wirkungsmodells bzw. den darin enthaltenen Bewertungsparametern, kann die Erklärung des Systemverhaltens (durch die Erweiterung bzw. Ergänzung der bestehenden Ansätze der Kennlinientheorie um diese Faktoren), welches durch die Produktionskennlinien und den darin abgebildeten logistischen Zielgrößen beschrieben wird, in Abhängigkeit von der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeward vorgenommen werden bzw. dient dieses als Basis zur Ableitung und Formulierung von Verhaltenshypothesen und zur Entwicklung eines Vorgehenskonzepts, mit welchem die gezielte Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeward auf die logistischen Zielgrößen erfolgen kann.

Da sowohl das Beschreibungs- als auch das Erklärungsmodell die Gegebenheiten in einem hybriden Produktionssystem fokussieren, müssen beide Modelle um die Erkenntnisse aus den Abschnitten 3.3.3.2 (Beurteilung der Anwendbarkeit von Produktionskennlinien in hybriden Produktionssystemen) und 4.2.5 (Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss in hybriden Produktionssystemen) erweitert werden. Diese implizieren, dass die Modellierung zur Beschreibung und Erläuterung des Losgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf die Logistikleistung und die Logistikkosten in einem hybriden Produktionssystem, welches sowohl Stoffumwandlungs- als auch Stoffumformungsprozesse beinhaltet, zunächst in getrennten Teilaspekten zu erfolgen hat. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge in einem Stoffumwandlungsprozess anderen Parametern unterliegt bzw. andere Ursache-Wirkungsbeziehungen aufweist als jener in einem Stoffumformungsprozess. Um eine möglichst vollständige Abbildung des tatsächlichen Systemverhaltens zu realisieren, bedarf es der zunächst der Aufspaltung des Produktionssystems in diese beiden Bereiche um darauf aufbauend, ein Totalmodell zu entwickeln. Im Nachfolgenden werden nochmals die Zielsetzungen (siehe Abbildung 50) und die Anforderungen (Abbildung 51) an die zu entwickelnden Modelle veranschaulicht.

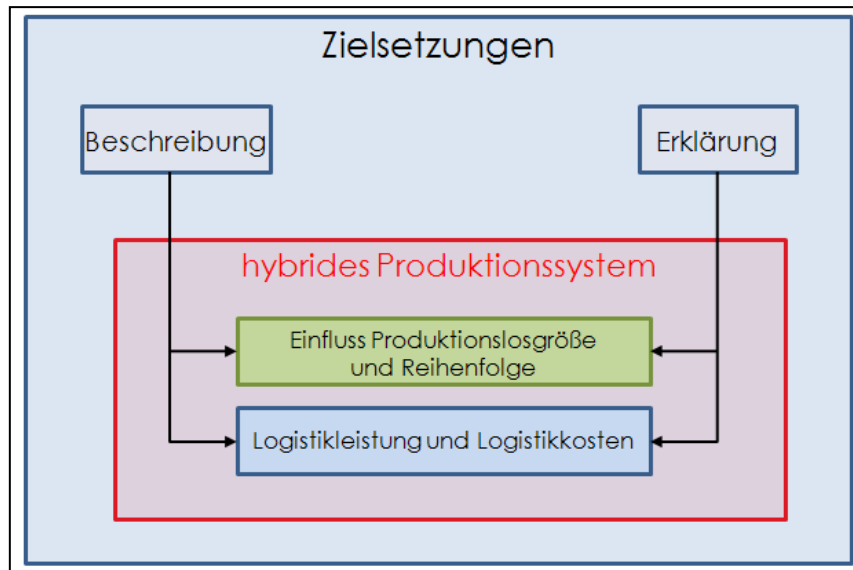


Abbildung 50: Zielsetzungen der zu entwickelnden Modelle<sup>513</sup>

Die Zielsetzungen der zu entwickelnden Modelle stellen die Beschreibung und Erklärung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen, welche die Logistikleistung und Logistikkosten eines hybriden Produktionssystems repräsentieren, dar.

Aus den Zielsetzungen an das Beschreibungs- als auch das Erklärungsmodell leiten sich die Anforderungen an die zu erstellenden Modelle ab. Um den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen der Logistikleistung und der Logistikkosten in einem hybriden Produktionssystem darstellen und bestimmen zu können, bedarf es der Ermittlung der wesentlichen Elemente und Wechselwirkungen, welche in einem hybriden Produktionssystem herrschen, der Bestimmung der Komplexitätstreiber und Einflussfaktoren (sowohl monetäre als auch nicht monetäre) der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung sowie der Untersuchung der Anwendbarkeit der Darstellung von Produktionskennlinien in hybriden Produktionssystemen. Weiters hat die Festlegung jener Einflussgrößen bzw. Zielgrößen zu geschehen, anhand derer die Logistikleistung und -kosten eines hybriden Produktionssystems gemessen werden können.

<sup>513</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

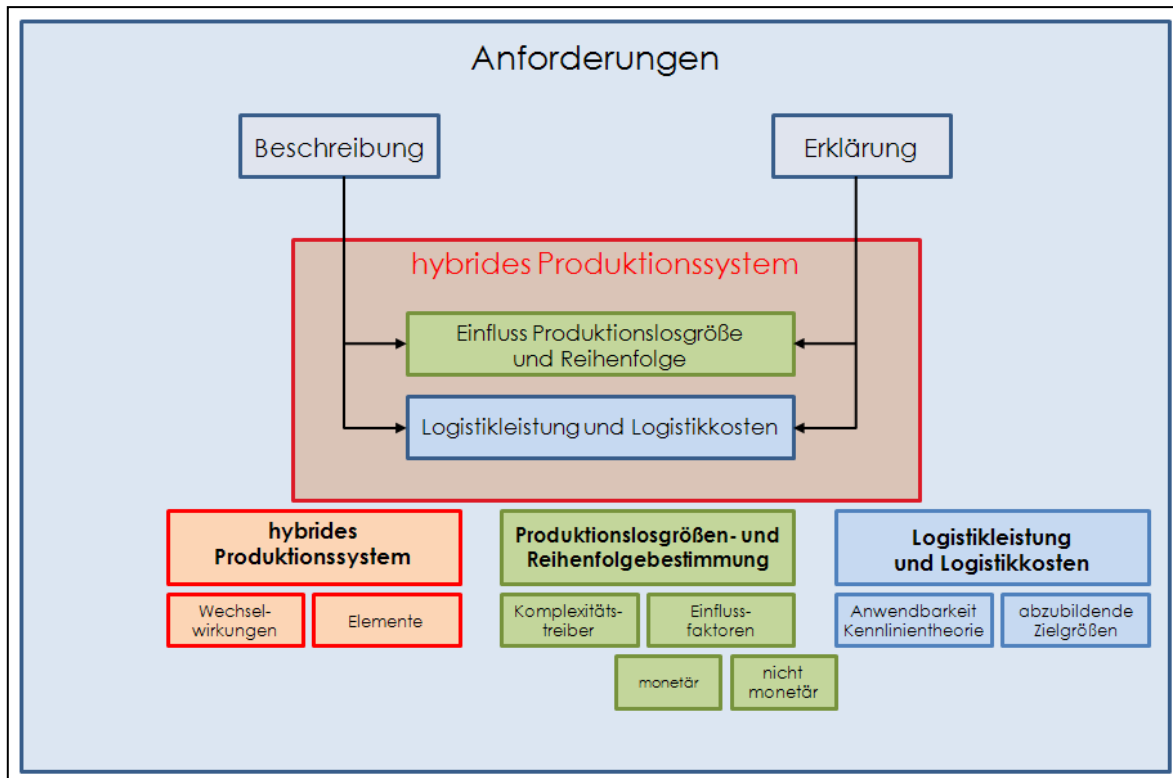


Abbildung 51: Anforderungen an die zu entwickelnden Modelle<sup>514</sup>

Die Validierung und Verifizierung der, auf die hier beschriebenen Anforderungen, entwickelten Modelle erfolgt durch die Erstellung eines Simulationsmodells für ein konkretes Beispiel aus der betrieblichen Praxis (siehe dazu Kapitel 5). Daher wird im Abschnitt 3.5.3 eine Einführung in die Simulation von Produktionssystemen gegeben.

### 3.5.3 Simulation von Produktionssystemen

Die Untersuchung dynamischer bzw. sich über die Zeit veränderlicher Sachverhalte wird in vielen Bereichen der Ingenieur-, Natur- und Wirtschaftswissenschaften über die Methodik der Simulation unterstützt. Auch in der Logistik hat die Simulation zur methodischen Absicherung der Planung, Steuerung und Überwachung der Material-, Personen-, Energie- und Informationsflüsse inzwischen ihren berechtigten Stellenwert eingenommen. Die Notwendigkeit der Simulation zur Planung, Realisierung und Betriebsführung logistischer Systeme wird heutzutage nicht mehr in Frage gestellt.<sup>515</sup> Die folgenden Ausführungen stützen sich in ihren Aussagen inhaltlich auf die Richtlinien der VDI 3633, die als Orientierungshilfe den Einstieg in die Simulationstechnik erleichtern und dem Anwender ein besseres Verständnis für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Simulationsstudien zur Untersuchung von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen vermitteln soll.<sup>516</sup>

<sup>514</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>515</sup> Siehe dazu umfassend Kuhn et al. (1993).

<sup>516</sup> Vgl. VDI 3363, Blatt 1.

### 3.5.3.1 Grundlagen zur Simulation von Produktionssystemen

Aufbauend auf den Modellierungsprozess im Zuge dessen die abstrahierte und meist auch idealisierte Modellstruktur eines logistischen Systems entsteht, kann die Implementierung dessen in ein Simulationsmodell erfolgen.<sup>517</sup>

Nach Engesser<sup>518</sup> bezeichnet eine Simulation in der Informatik ganz allgemein die „Nachbildung von Vorgängen auf einer Rechenanlage auf der Basis von Modellen.“ Im Rahmen der VDI Richtlinie 3633 wird diese sehr allgemeine Definition für den in dieser Arbeit relevanten Bereich des Materialflusses, der Logistik und Produktion wie folgt konkretisiert: Unter einer Simulation versteht man „[...] das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“<sup>519</sup>

Als wesentliche Kriterien der Simulation sind die Modellierung der Zeit, die Umsetzung der Prozesse in einer zeitlichen Abarbeitungsreihenfolge und der automatische Ablauf der Simulation in einem vorgegebenen Zeithorizont zu sehen.<sup>520</sup> Die Abbildung stochastischer Sachverhalte und die Darstellung von Synchronisationen sind ebenso Teil der Simulation wie die Bildung von Kennzahlen zur Bewertung des zeitvarianten Modellverhaltens.<sup>521</sup>

Als Simulationsmodell bezeichnet man ein zu Simulationszwecken erstelltes Modell.<sup>522</sup> Das charakteristische Merkmal eines Simulationsmodells ist seine Experimentierbarkeit.<sup>523</sup> Ein Simulationsexperiment beschreibt dabei die zielgerichtete Untersuchung des Modellverhaltens. Hierzu wird das Simulationsexperiment in Simulationsläufe mit systematischer Parameter- oder Strukturvariation unterteilt. Ein Simulationslauf beschreibt dabei das Verhalten eines Systems in einem Modell in einem bestimmten Zeitraum. Die Werte der untersuchungsrelevanten Zustandsgrößen werden dabei über einen vordefinierten Zeitraum erfasst und statistisch ausgewertet.<sup>524</sup> Zusammengefasst kann also mit Hilfe der Simulation das zeitliche Ablaufverhalten komplexer Systeme untersucht werden.<sup>525</sup>

Der Vorteil eines Simulationsmodells liegt darin begründet, dass es die Durchführung von Experimenten, welche am realen System zu aufwendig, zu kostspielig oder erst gar nicht realisierbar wären, erlaubt. Die Notwendigkeit der Simulation von Produktionssystemen liegt vor allem dann vor, wenn real nicht existierende logistische Sachverhalte vorliegen, die Wirkungs-

---

<sup>517</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 44 f.

<sup>518</sup> Engesser et al. (1993), S. 648.

<sup>519</sup> VDI 3633, Blatt 1:2.

<sup>520</sup> Vgl. Arnold et al. (2008), S. 74.

<sup>521</sup> Vgl. Hecking (2009), S. 4.

<sup>522</sup> Vgl. Hecking (2009), S. 3.

<sup>523</sup> Vgl. VDI 3633, Blatt 1:3.

<sup>524</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-42.

<sup>525</sup> Vgl. Wachsmann (2006), S. 28.

zusammenhänge eine sehr hohe – mit analytischen Methoden<sup>526</sup> nicht mehr abbildbare – Komplexität besitzen, Zukunftsszenarien betrachtet werden sollen, mehrere Gestaltungsvarianten analysiert werden müssen oder die Untersuchung des Systemverhaltens über einen längeren Zeitraum erfolgen soll.<sup>527</sup> Mittels des Einsatzes einer Simulation lässt sich im Wesentlichen die Analyse des Systemverhaltens im Sinne eines „What if?“ (z.B. Wie verändert sich das Leistungsverhalten des betrachteten Produktionssystems, wenn die Losgröße und Reihenfolge verändert wird?) und die Ermittlung von Maßnahmen im Sinne eines „What to do to achieve?“ (z.B. Welche Schritte müssen bei der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf logistische Zielgrößen erfolgen bzw. berücksichtigt werden, um die bestmögliche Aufeinanderabstimmung dieser zu erzielen?) beantworten.<sup>528</sup> Die Simulation ist grundsätzlich kein Selbstzweck, vielmehr wird durch deren Einsatz ein bestimmtes Untersuchungsziel für ein vorgegebenes System verfolgt.<sup>529</sup>

Typische Fragestellungen orientieren sich dabei am klassischen Zielsystem der Logistik, wo mitunter durch Simulation eine Steigerung der Auslastung, eine Erhöhung der Ausbringung, eine Verbesserung des Servicegrades bei gleichzeitiger Reduzierung der Durchlaufzeit, Beständen und Prozesskosten erreicht werden soll (siehe dazu Abbildung 52).

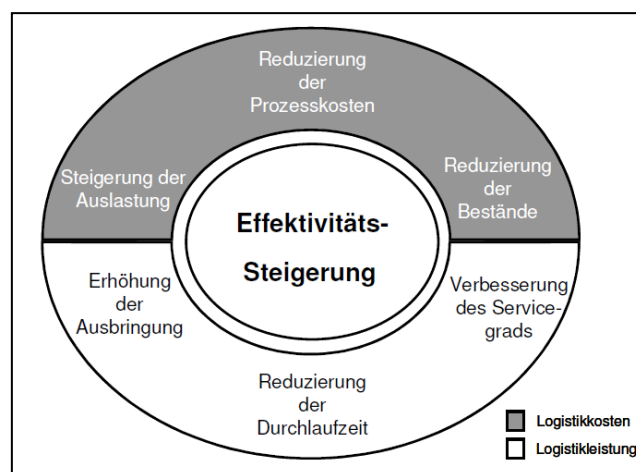


Abbildung 52: Ziele des Simulationseinsatzes in der Produktion<sup>530</sup>

Um die Simulation möglichst effektiv und effizient durchzuführen, wurde eine Reihe an Leitsätzen erarbeitet, die sich mit dem Stellenwert der Simulation in der Anwendung, der Modellbildung und den Simulationsergebnissen befassen. Auszugsweise werden nun einige wesentliche Leitsätze, welche auf der VDI 3633 und dem ASIM-Leitfaden<sup>531</sup> beruhen, erläutert:

- Simulation setzt die im Vorhinein durchgeführte Zieldefinition und Aufwandsabschätzung voraus.

<sup>526</sup> Die Simulation entwickelt gegenüber analytischen Methoden Prozesse (Zustandsfolgen in der Zeit) endogen auf Grund der im Modell dargestellten Wirkungszusammenhänge und Zeitmechanismen; siehe dazu umfassend Niemeyer (1990), S. 435 ff.

<sup>527</sup> Vgl. Wachsmann (2006), S. 8 f.

<sup>528</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-42.

<sup>529</sup> Vgl. Rabe et al. (2008), S. 81.

<sup>530</sup> Wachsmann (2006), S. 8.

<sup>531</sup> Siehe dazu ASIM-Leitfaden (1997), Heft 58.

- Vor der Simulation hat die Überprüfung, ob die Zielerreichung mittels analytischer Methoden realisierbar ist, zu erfolgen.
- Die Simulation stellt keinen Ersatz für die Planung von Produktionssystemen dar.
- Simulationsexperimente liefern in der Regel keine Optimierung. Diese geben ein Indiz für die Richtungslenkung, um die im Sinne der Zielerreichung best mögliche Lösung zu erhalten.
- Die Erstellung des Simulationsmodells muss in einem angemessenen Aufwand-Nutzen-Verhältnis stehen.
- Die Qualität des Simulationsergebnisses hängt in entscheidendem Maße von der zugrundeliegenden Datenbasis ab. Liegt keine ausreichende Datenbasis vor, können die Ergebnisse der Simulation als wertlos betrachtet werden.

Der Nutzen der Simulation kann u.a. im erzielten Sicherheitsgewinn durch die Vermeidung von Fehlplanungen, der Bestätigung des Planungsvorhabens sowie der Absicherung der Funktionalität von System und Steuerung und damit der Minimierung des unternehmerischen Risikos gesehen werden. Weiters kann dadurch ein besseres Systemverständnis, die Vereinfachung von Systemstrukturen, die Verbesserung in der Planung von Puffergrößen und Lagerbeständen oder ein insgesamt günstigerer Anlagenbetrieb (beispielsweise durch die Verkürzung der Anlaufzeiten oder der Minimierung von Ausfall- und Störzeiten) erzielt werden.<sup>532</sup> Der Nutzen liegt vor allem in der Schaffung quantifizierbarer Ergebnisse für zu betrachtende Lösungsvarianten als objektive Argumentations- und Entscheidungsbasis.<sup>533</sup>

Zu den Grundlagen der Simulation zählen neben den system- und modelltheoretischen Aspekten (siehe dazu Abschnitte 3.2.2 und 3.5.1.2) methodische, konzeptuelle und stochastische Zusammenhänge, auf welche nun im Anschluss eingegangen wird.

### 3.5.3.2 Methodische, konzeptuelle und stochastische Sachzusammenhänge im Zuge der Erstellung von Simulationsmodellen

Eine Simulationsmethode definiert für die Simulation die Art und Weise, wie das Zeitverhalten Berücksichtigung findet. Dabei kann zwischen einer kontinuierlichen und diskreten Simulation unterschieden werden.<sup>534</sup>

Bei der *kontinuierlichen Simulation* werden die Zustandsvariablen zur Beschreibung des Modells in einem stetigen Verlauf abgebildet. Bei der *diskreten Simulation* hingegen erfolgt die Betrachtung der Zustandsänderungen zu diskreten Zeitpunkten.<sup>535</sup> Dabei kann das Fortschrei-

---

<sup>532</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-44.

<sup>533</sup> Vgl. Wachsmann (2006), S. 35.

<sup>534</sup> Vgl. Thaler (2011), S. 6.

<sup>535</sup> Vgl. Domschke et al. (2005), S. 224 f.

ten der Zeit nach zwei Methoden erfolgen: über die *ereignisorientierte* oder auch *asynchrone diskrete Simulation* sowie über die *zeitgesteuerte* oder auch *synchrone diskrete Simulation*. Während bei der ereignisorientierten Simulation die Zustandsänderungen innerhalb des Simulationsmodells über das Eintreten von Ereignissen verursacht werden, schreitet die Simulationszeit bei der diskreten zeitgesteuerten Methode um ein vorher festgelegtes konstantes Zeitinkrement  $\Delta t$  voran.<sup>536</sup>

Dynamische Modelle lassen sich nach der Detaillierungsgrad der Reproduzierbarkeit von Produktionsabläufen in Flusssystemen in *makro-*, *meso-* und *mikroskopische Simulationsmodelle* klassifizieren: *Makroskopische Simulationsmodelle* werden auf Basis von Differentialgleichungen erstellt und bilden auf einer sehr abstrakten Ebene im Sinne ihrer eigenen Darstellungsform und sehr vereinfacht im Sinne der Darstellungsmöglichkeiten für Objekt- und Materialflusstypen sowie Steuerungsprinzipien reale Gegebenheiten ab. *Mesoskopische Simulationsmodelle* nehmen bezüglich des Detaillierungsgrades von realen Objekten den Platz zwischen der makroskopischen und mikroskopischen Modellierung ein. Diese werden nach der Idee gebildet, dass man auf die Verfolgung einzelner Objekte verzichtet und anstatt dessen mit Objektmengen operiert, welche durch ein gezieltes, gemeinsames Verhalten gekennzeichnet sind und auf bestimmte Räume bezogen werden. Durch die Operation mit Mengen von Objekten und Flüssen, welche einer „logischen Gruppe“ angehören und über Zeit und Raum verteilt sind, kann die Berechnung anhand mathematischer Formeln als kontinuierliche Größe in jedem Schritt  $\Delta t$  der diskreten Modellzeit erfolgen. Die Steuerung der modellierten Prozesse wird hierbei durch die in  $\Delta t$  Schritten vorgenommene Überprüfung beliebiger Bedingungen und der jeweiligen Änderungen im System realisiert. *Mikroskopische Simulationsmodelle* umfassen alle Simulationsmodelle, welche auf der diskreten Ereignissimulation basieren. Diese weisen den höchsten Detaillierungsgrad im Sinne der Abbildung von Objekten der realen Welt auf.<sup>537</sup>

Da für die Simulation logistischer Systeme die zeitgesteuerten und kontinuierlichen Ansätze weniger relevant sind, werden im Folgenden nur die Ansätze der diskreten ereignisorientierten Simulation (siehe dazu Abbildung 53) beleuchtet.

---

<sup>536</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-46 f.

<sup>537</sup> Vgl. Schenk et al. (2008), S. 464 f.



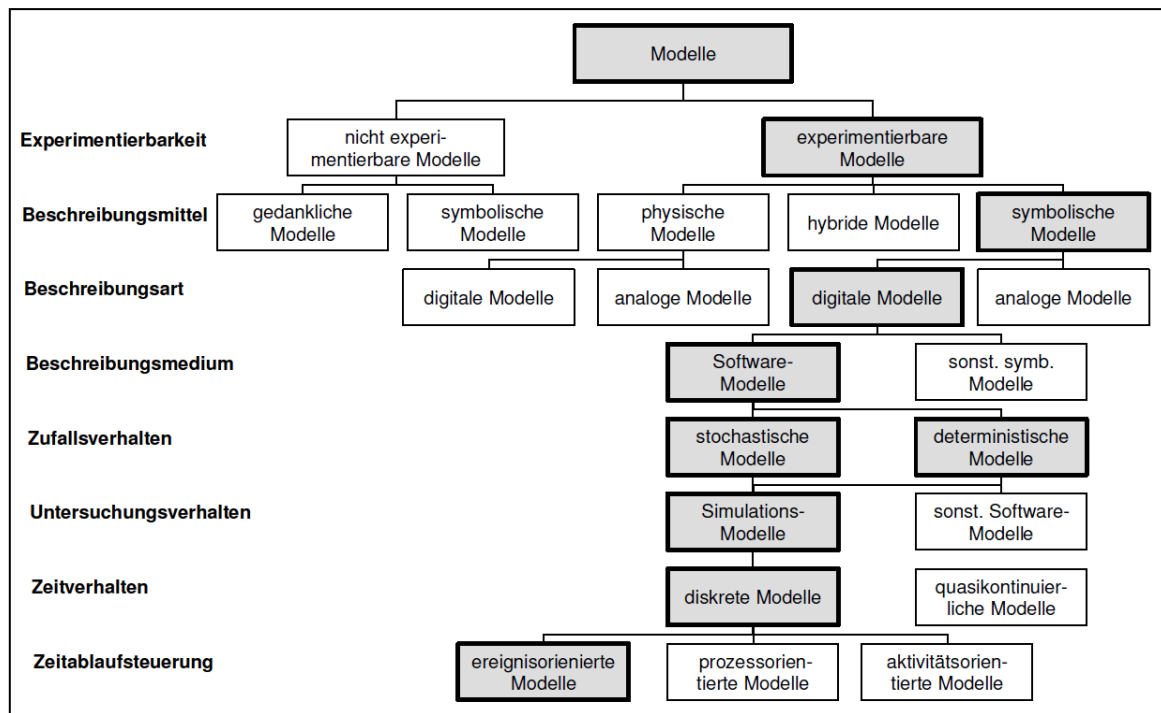


Abbildung 53: Einordnung der Simulation in die Klassifikation von Modellen<sup>538</sup>

Bei der diskreten ereignisorientierten Modellierung wird das zu betrachtende System über *Ereignisse*, *Aktivitäten* und Prozesse abgebildet:<sup>539</sup>

Ein *Ereignis* ist grundsätzlich atomar und daher nicht weiter zerlegbar. Der Eintritt dessen erfolgt in der Regel zu nicht äquidistanten Zeitpunkten und der über das Ereignis entstandene Zustand behält im Simulationsmodell bis zum nächsten Ereignis seine Gültigkeit.<sup>540</sup>

Eine *Aktivität*, welche über ein Anfangs- und Endereignis begrenzt ist, umfasst eine zeitbehaftete Operation, welche den Zustand eines einzigen Objekts transformiert.<sup>541</sup>

Ein *Prozess* beschreibt eine zeitlich geordnete und inhaltlich zusammengehörige Folge von Ereignissen, die meist einem bestimmten Simulationsobjekt zugeordnet ist.<sup>542</sup>

Dieser Arbeit liegt ein anwendungsorientiertes Modellierungskonzept zugrunde, welches durch anwendungsnahe Beschreibungsmittel und der Orientierung in ihrer Begrifflichkeit an den abzubildenden Systemen gekennzeichnet ist. Typische Vertreter sind so genannte „Bausteinkonzepte“, die für ein bestimmtes Anwendungsfeld topologische, organisatorische und informatorische Elemente zweckmäßig aggregiert und vordefiniert sowie aus Anwendungssicht parametrisierbar bereitstellen.<sup>543</sup>

<sup>538</sup> Wachsmann (2006), S. 28 in Anlehnung an Kosturiak et al. (1995).

<sup>539</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-47.

<sup>540</sup> Vgl. Kolonko (2008), S. 184 f.

<sup>541</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-47.

<sup>542</sup> Vgl. März (2008), S. 108.

<sup>543</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-49.

*Bausteinkonzepte* berücksichtigen meist sowohl die funktionsorientierte Sichtweise (Fertigen, Montieren, Prüfen etc.) als auch die aufbau-/strukturorientierte bzw. topologische Sichtweise (Förderstrecke, Lager etc.).<sup>544</sup> Auch das im Zuge der Umsetzung der entwickelten Modelle und Vorgehensweise erstellte Simulationsmodell weist das beschriebene Bausteinkonzept (siehe dazu Kapitel 5) auf und kann daher der anwendungsorientierten Modellkonzeption zugeordnet werden.

In der Modellbildung und Simulation spielen über die Wahrscheinlichkeitstheorie begründete Annahmen und Aussagen eine entscheidende Rolle, da mit Hilfe derer zufällige Einflüsse mathematisch beschrieben und Aussagen über ihre Gesetzmäßigkeiten hergeleitet werden können.<sup>545</sup>

Ereignisse, die unter bestimmten Umständen eintreten können, aber nicht notwendigerweise eintreten müssen, werden als zufällige Ereignisse bezeichnet. Diese können im Zuge eines Zufallsexperiments entstehen. Das Ziel eines solchen zufälligen Versuchs stellt die Ermittlung eines zahlenmäßigen Werts, der so genannten Zufallsgröße, dar. Dabei wird die Zufallsgröße durch die zugrundeliegende Verteilungsfunktion bestimmt. Zusätzliche, jedoch in der Regel nicht vollständige Informationen, liefern Kennwerte (Parameter) der Verteilungsfunktion wie beispielsweise den Erwartungswert, der von der Vorstellung eines Mittelwertes, um den sich die Werte der Zufallsgröße ansiedeln, interpretiert werden kann. Weiters kann die Bestimmung der Varianz erfolgen, welche über die mittlere quadratische Abweichung angibt, wie stark die Werte der Zufallsgröße um den Erwartungswert streuen. Die Streuung selbst wird auch als Standardabweichung bezeichnet.<sup>546</sup>

Zur Beschreibung verschiedener Wahrscheinlichkeiten ist eine Reihe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen diskreter und stetiger Zufallsgrößen von Bedeutung:

Für *diskrete Zufallsgrößen*, welche nur einen endlichen (oder höchsten abzählbaren unendlichen) Wertebereich aufweisen, sind die *gleichmäßig diskrete Verteilung*, welche durch endlich viele Werte mit gleicher Wahrscheinlichkeit gekennzeichnet ist, die *Poisson-Verteilung*, die insbesondere bei Ankunftsprozessen Verwendung findet und die *Binomialverteilung*, welche bei einer Menge voneinander unabhängiger, sich identisch verhaltender Sachverhalte mit gleicher zufallsbedingter Ausprägung eingesetzt wird, zu nennen.<sup>547</sup>

Die *Gleichverteilung*, die *Normalverteilung* und die *Exponentialverteilung* gehören den *stetigen* oder *kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen* an. Die *Gleichverteilung* (auch gleichmäßig stetige Verteilung genannt) nimmt an, dass eine Zufallsgröße in gleich lange Teilintervalle ihres Wertebereichs mit gleicher Wahrscheinlichkeit fällt. Die *Normalverteilung* beschreibt eine Zufallsgröße, die sich als Ergebnis der Überlagerung vieler unabhängiger und

<sup>544</sup> Vgl. Wachsmann (2006), S. 31.

<sup>545</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-50.

<sup>546</sup> Vgl. Hesse (2009), S. 332 ff.

<sup>547</sup> Vgl. Hesse (2009), S. 332 ff.

in ihrer Wirkung etwa gleich starker Einflüsse interpretieren lässt und die *Binomialverteilung* findet bei der Modellierung von Zeitdifferenzen zwischen zufälligen Ereignissen wie u.a. Zwischenankunftszeiten oder dem Eintritt von Störungen im Produktionsablauf Verwendung.<sup>548</sup> Auf die Ausführung der mathematischen Details wird an dieser Stelle verzichtet (siehe dazu umfassend Bratley<sup>549</sup>, Law<sup>550</sup> und Weber<sup>551</sup>).

Daran anschließend erfolgt nun die Beschreibung der Vorgehensweise im Zuge einer Simulationsstudie.

### 3.5.3.3 Vorgehensweise im Zuge der Simulationserstellung

Die Vorgehensweise während einer Simulationsstudie, welche je nach vorhandener Ressourcen entweder fremdvergeben oder intern durchgeführt werden kann, lässt sich in einer ersten Grobunterteilung in die Phasen *Vorbereitung*, *Durchführung* und *Auswertung* gliedern (siehe dazu Abbildung 54).<sup>552</sup>

Die einzelnen Schritte innerhalb der Phasen sind in ihrer prinzipiellen Abfolge sukzessiv nacheinander zu bearbeiten, wobei jedoch zwischen allen Schritten Iterationsschleifen sinnvoll und möglich sind, wenn das Ergebnis des vorangegangenen Schrittes nicht den Erwartungen in Bezug auf das erreichte Ergebnis entspricht. Im Zuge der Erstellung des Simulationsmodells in Kapitel 5 wurde nach der hier beschriebenen Vorgehensweise vorgegangen.

---

<sup>548</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-50.

<sup>549</sup> Siehe dazu Bratley et al. (1987).

<sup>550</sup> Siehe dazu Law et al. (1991).

<sup>551</sup> Siehe dazu Weber (1992).

<sup>552</sup> Vgl. VDI 3363, Blatt 1:11.

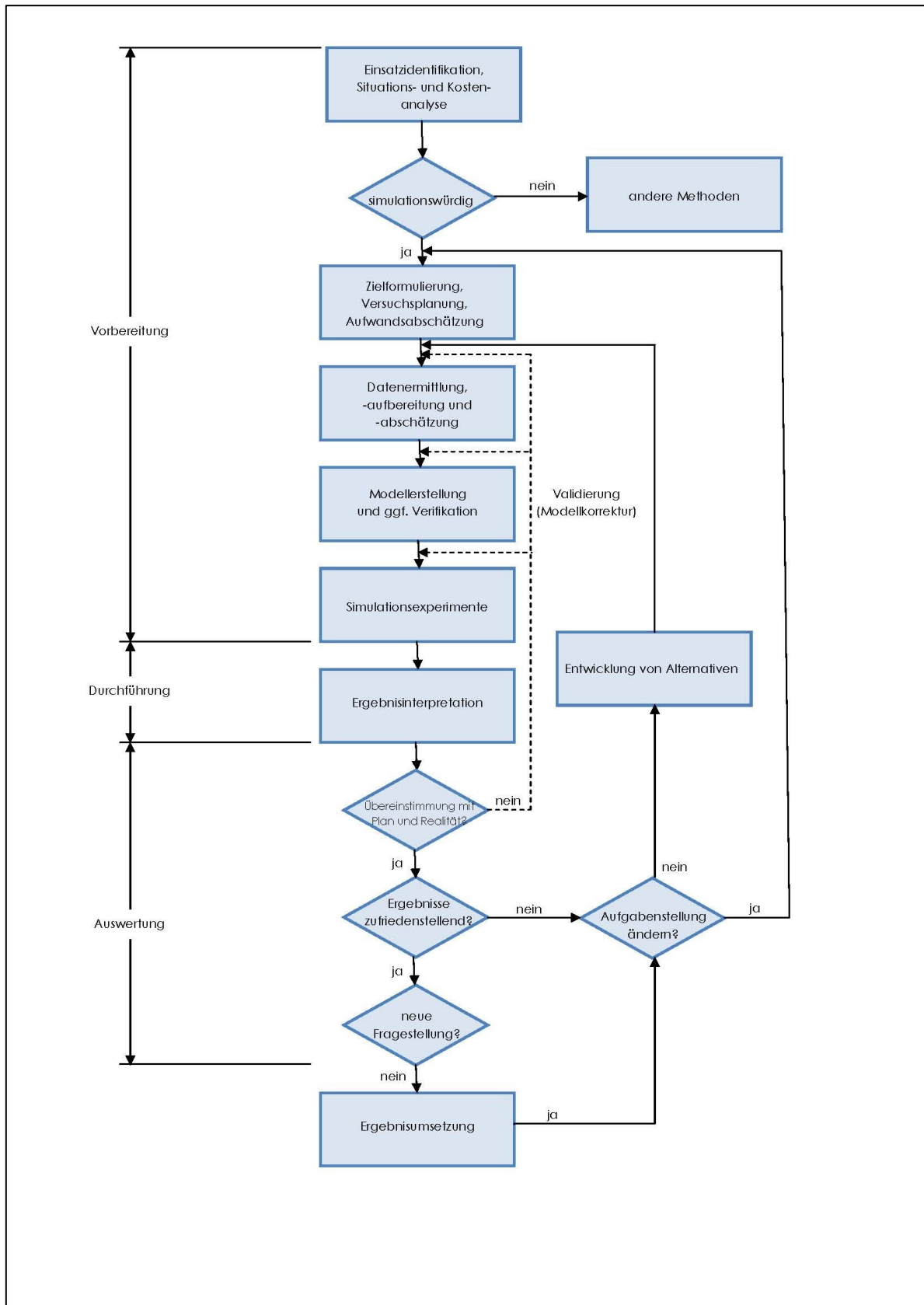


Abbildung 54: Vorgehensweise im Zuge der Simulationserstellung<sup>553</sup>

<sup>553</sup> In Anlehnung an VDI 3633, Blatt 1:11.

Im Folgenden werden nun die Schritte einer Simulationsstudie (nach der VDI-Richtlinie 3633) erläutert:

Zu Beginn ist über die Einsatzdefinition, die eigentliche Aufgaben- und Problemstellung zu definieren und mittels einer Situations- und Kostenanalyse zu prüfen, ob die Erstellung eines Simulationsmodells gerechtfertigt und die zu untersuchenden Fragestellungen damit beantwortet werden können. Bei der Zielformulierung ist der Aufwand für die Datenbeschaffung und Simulationserstellung dem Nutzen der daraus resultierenden Ergebnisse gegenüber zu stellen.<sup>554</sup>

Ist die Simulationswürdigkeit gegeben, kann in einem nächsten Schritt, der Vorbereitungsphase, die Abgrenzung gegen andere Fragestellungen, welche nicht zum Untersuchungsgegenstand gehören, erfolgen und die nähere Formulierung der Aufgaben und Ziele einschließlich der geplanten Experimente ausgearbeitet werden. Auch hierbei gilt es eine detaillierte Aufwandsabschätzung anzustellen.<sup>555</sup>

Im Anschluss erfolgt die Konzipierung des groben Simulationsmodells anhand der notwendigen Daten. Die Ermittlung, Aufbereitung und Abstimmung der Daten schließt unmittelbar daran an und stellt einen aufwandsmäßig nicht außer Acht zu lassenden Aspekt dar. Der Prozess der Datenerhebung wird mit der Aufbereitung der Daten für die Simulation über Plausibilitätstests, Klassifikationen und Verdichtungen abgeschlossen.<sup>556</sup> Die systembeschreibenden Daten lassen sich dabei in *technische Daten*, zur Beschreibung der Anlagentopologie sowie der einzelnen Systemkomponenten, in *organisatorische Daten* zur Definition der Arbeitszeit- und Ablauforganisation sowie der Ressourcenzuordnung und in *Systemlastdaten*, bestehend aus Daten für die Auftragseinlastung und Produktion, unterscheiden.<sup>557</sup> Die Komplexität und der Detaillierungsgrad der benötigten Daten unterscheiden sich entsprechend dem vorliegenden Aufgabenschwerpunkt und hinsichtlich des geplanten Untersuchungsziels.

Die Umsetzung des unter Daten- und Prozesssicht erstellten Modells in ein softwaretechnisches Abbild erfolgt unter der Verwendung eines Simulationsinstrumentes und unter den für dieses Werkzeug vorliegenden Rahmenbedingungen zur Modellierung der Aufbau- und Ablauforganisation des zu betrachtenden Systems. Ebenfalls festgelegt und modelliert wird das Verhalten an den Systemgrenzen durch die Verwendung von Quellen und Senken. Häufig bedient man sich hierbei stochastischen Verteilungen, die das Ankunftsverhalten aus dem vorgelagerten System und das Bedienverhalten des nachgelagerten Systems annähernd beschreiben.<sup>558</sup>

---

<sup>554</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-54.

<sup>555</sup> Vgl. Wachsmann (2006), S. 42.

<sup>556</sup> Vgl. Hecking (2009), S. 15 f.

<sup>557</sup> Vgl. Meyer et al. (1993), S. 348 ff.

<sup>558</sup> Vgl. Arnold et al. (2004), S. A 2-56.

Der Aufwand für die Modellierung eines Systems ist u.a. abhängig vom tatsächlichen Systemumfang, welcher durch die Systemgröße und die Komplexität der Strukturen und Abläufe bestimmt wird, sowie dem auf Basis der Zielsetzung und des Untersuchungsschwerpunkts notwendigen Detaillierungsgrad des Modells.<sup>559</sup>

Nach Abschluss der Implementierungsarbeiten ist die Verifikation, d.h. der formale Nachweis der Korrektheit des erstellten Programms notwendig. Als entscheidender Schritt während und nach dem Abschluss der Simulationserstellung ist die Validierung, wo die Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Original erfolgt, zu nennen. Hierbei muss sichergestellt werden, dass das Modell das Verhalten des betrachteten Systems hinreichend genau und fehlerfrei widerspiegelt und damit für die anschließenden Experimente Gültigkeit besitzt. Die Gültigkeit eines Modells bezieht sich dabei auf die strukturellen Beziehungen, das funktionale Verhalten, die verwendeten Datenbeschreibungen sowie die Anwendbarkeit des Modells zur Analyse des zu betrachtenden Untersuchungsgegenstands.<sup>560</sup>

Die durchzuführenden Experimente sollen dem Anwender der Simulation Entscheidungshilfen für seine Aufgabenstellungen liefern. Eine Interpretation der Ergebnisse und die Ableitung von Maßnahmen für das zu untersuchende System sind allerdings nur dann möglich, wenn das erstellte Modell validiert und in seinem Ablauf verständlich ist. Die Ergebnisinterpretation erfolgt in der Regel in Zusammenarbeit zwischen dem Auftraggeber und dem Simulationsersteller, da nur so auf Basis des Simulationsmodells ein gemeinsames Systemverständnis erzielt und Ansätze für Verbesserungsmaßnahmen identifiziert werden können.<sup>561</sup>

Ebenso wird die Qualität der erreichten Ergebnisse maßgeblich durch die Qualität der verwendeten Daten und die Präzision der im Vorfeld durchgeführten Arbeiten wie beispielsweise der Systemabgrenzung und der Ermittlung der Wirkungszusammenhänge der Systemelemente bestimmt.<sup>562</sup>

Die Relevanz von Simulationsmodellen bei der Planung, der Realisierung und dem Betrieb logistischer Systeme wird vor allem in der Möglichkeit der Abbildung des dynamischen Systemverhaltens gesehen. Die schnell realisierbare Abbildung verschiedenster Szenarien bildet u.a. die Basis für die Ableitung von Maßnahmen zur Verbesserung bestehender Produktionsabläufe, für die Entwicklung neuer Strukturen in Produktionssystemen, aber auch um rasch auf Störungen im Produktionsablauf reagieren zu können.<sup>563</sup>

---

<sup>559</sup> Vgl. Kühn (2006), S. 23 f.

<sup>560</sup> Vgl. Rabe et al. (2008), S. 14 f.

<sup>561</sup> Vgl. Bangsow (2008), S. 14.

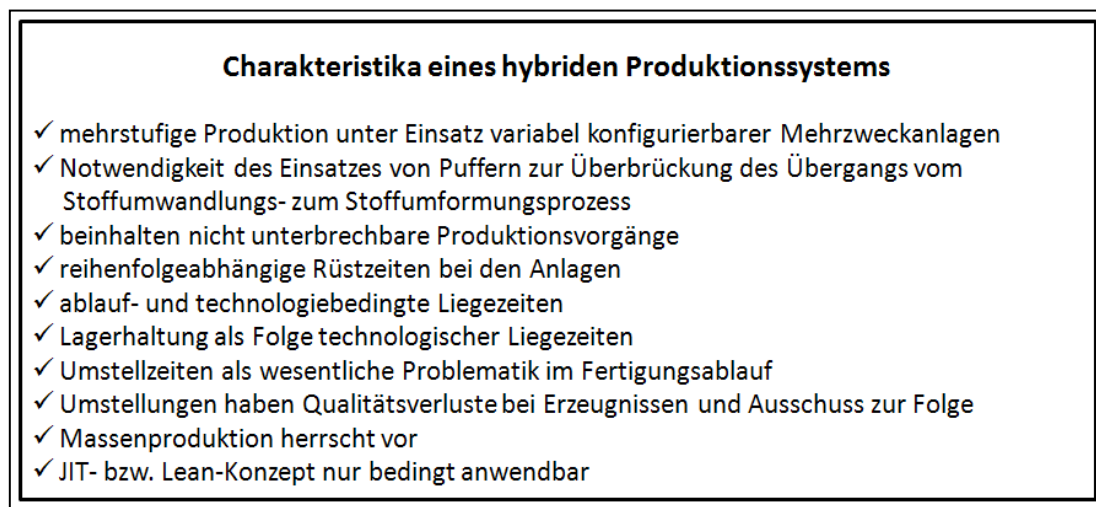
<sup>562</sup> Vgl. Wenzel et al. (2008), S. 145 ff.

<sup>563</sup> Vgl. Reggelin (2011), S. 287.

### 3.6 Zusammenfassung

Abschließend wird nun eine Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte und Erkenntnisse von Kapitel 3 gegeben.

Zu Beginn wurden die wissenschaftstheoretischen Grundlagen zu Produktionssystemen erläutert, damit im Anschluss daran, unter Zuhilfenahme der Ansätze der Systemtheorie, die Charakteristika eines hybriden Produktionssystems erarbeitet werden konnten. In Abbildung 55 sind nochmals die wesentlichen Merkmale einer Hybridfertigung, welche sich aus den Verfahren der Prozess- und Fertigungsindustrie zusammensetzt und somit die Schnittstelle zwischen diesen beiden Industrietypen darstellt, zusammengefasst:



**Abbildung 55: Zusammenfassung der Charakteristika eines hybriden Produktionssystems<sup>564</sup>**

Im Anschluss daran wurden die Grundlagen zur Kennlinientheorie und deren Ansätze zur Modellierung beleuchtet. Als wesentliche Erkenntnis konnte dabei festgestellt werden, dass die bestehenden Ansätze der Kennlinientheorie, welche von einem eingeschwungenen Betriebszustand des gesamten Arbeitssystems ausgehen, zur Abbildung eines hybriden Produktionssystems, welches sowohl Prozesse der Stoffumwandlung als auch der Stoffumformung beinhaltet, nicht ohne weiteres übernommen werden können, da die Voraussetzung, dass ein hybrides Produktionssystem ein über den gesamten Betrachtungsbereich ähnliches Systemverhalten aufweist, aufgrund der unterschiedlichen Fertigungsstrukturen und der damit veränderlichen Einflussparameter kaum gegeben ist. Daher ist zunächst eine getrennte Systemanalyse beider Fertigungsbereiche notwendig bzw. sinnvoll, um im Anschluss daran, die Ergebnisse in einem Totalmodell zusammenzufügen. Weiters hat die Tatsache Beachtung zu finden, dass eine Adaptierung der in der Kennlinientheorie beschriebenen Zusammenhänge im Hinblick auf die Gegebenheiten in einem hybriden Produktionssystem zu erfolgen hat, um sinnvolle Schlussfolgerungen daraus ziehen zu können. Es wurde auch versucht durch die Anwendung

<sup>564</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

einer anderen Basisgleichung (als der von Nyhuis und Wiendahl verwendeten  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion) zur Darstellung berechneter Kennlinien eine bessere und vor allem einfacher anwendbare Annäherung an die idealen Kennlinien zu erreichen. Dazu wurden zwei Ansätze diskutiert: Zunächst erfolgte die Betrachtung von Bezier-Kurven, welche aber wegen der Vielzahl an benötigten Daten zur Visualisierung und dem dadurch entstehenden nicht außer Acht zu lassenden Aufwand zur Erstellung als wenig geeignet angesehen wurden. Den zweiten, weit- aus viel versprechenderen Ansatz, stellt die Verwendung einer Sigmoid-Funktion als Basisfunktion dar. Somit konnte eine alternative Basisgleichung bzw. ein anderer Ansatz gefunden werden, dessen Eignung zur Darstellung berechneter Kennlinien in Kapitel 5 überprüft wird.

Im Abschnitt 3.4 wurden die bestehenden Ansätze der mehrstufigen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung diskutiert. Aus einer Vielzahl von verschiedenen Modellen zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung konnte das mehrstufige Losgrößenmodell mit Kapazitätsbeschränkungen und reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten und -kosten (kurz MLCLSD) als das sich am besten geeignete Modell aufgrund der darin getroffenen Annahmen und Berücksichtigungen zur Bestimmung der Losgröße und Reihenfolge in einem hybriden Produktionssystem identifiziert werden. Generell gilt zu sagen, dass je realitätsnäher ein Modell ist, desto komplexer und rechenintensiver ist dessen Ausführung. Dies ist ein wesentlicher Grund dafür, warum das klassische Losgrößenmodell bzw. das Modell von Wagner und Within auch heute noch in der betrieblichen Praxis am öftesten eingesetzt werden. Weiters wurde auch das Durchlauforientierte Losgrößenbestimmungsverfahren von Nyhuis vorgestellt, welches seinen Vorteil gegenüber den meisten Losgrößenmodellen in der Berücksichtigung der Kapitalbindung während des gesamten Produktionsprozesses sieht. Eine Modifizierung dessen in ein auslastungsorientiertes Losgrößenbestimmungsverfahren würde sich hinsichtlich des Einsatzes in einem hybriden Produktionssystem aufgrund der kapitalintensiven Aggregate besser eignen. Ebenso konnte festgestellt werden, dass es bezüglich der Anwendbarkeit in einem hybriden Produktionssystem kein Losgrößenbestimmungsverfahren gibt, dessen durchgängiger Einsatz anwendbar ist, da sich die einzelnen Prozesse in der Hybridfertigung und deren Anforderungen (nicht nur an die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung) stark voneinander differenzieren und daher zunächst eine getrennte Betrachtung derer sowie eine Analyse der herrschenden Interdependenzen zwischen der Stoffumwandlung und Stoffumformung notwendig sind.

Abschnitt 3.5 hat die Einführung in die Modellierung logistischer Systeme, wobei im Speziellen die Zielsetzungen und Anforderungen an die zu entwickelnden Modelle erarbeitet wurden (siehe dazu Abschnitt 3.5.2) zum Inhalt. Ebenso wurde in diesem Unterkapitel die Simulation von Produktionssystemen, welche im Zuge der Verifizierung und Validierung der Modelle durch die Erstellung eines Simulationsmodells am Beispiel der Gießerei einer Kupferhütte Einsatz findet, beleuchtet.



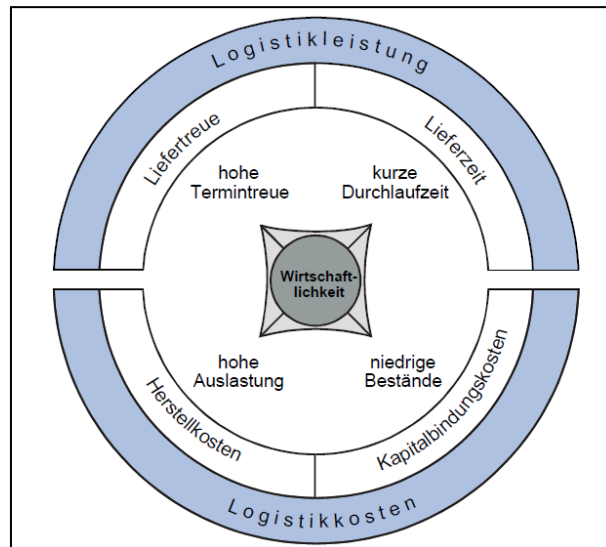
## **4 Modellierung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge in hybriden Produktionssystemen**

Kapitel 4 stellt mit der Analyse und Modellierung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem den Schwerpunkt dieser Dissertation dar. Um die Kernforschungsfrage dieser Arbeit beantworten zu können, erfolgt zunächst die Identifizierung der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit einer hybriden Fertigung. Im Anschluss daran werden die dabei auftretenden Produktionslosgrößen erläutert und ein Bewertungsinstrumentarium zur Bestimmung des Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf die Zielgrößen der Logistikleistung und Logistikkosten entwickelt. Es folgt die Beschreibung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen eines hybriden Produktionssystems. Weiters wird die Ergänzung der logistischen Kennlinien um den Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss vorgenommen und am Beispiel der hybriden Fertigung diskutiert. Ebenso wird in diesem Kapitel ein Vorgehenskonzept vorgestellt, mit Hilfe dessen die positive Abstimmung zwischen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung und den logistischen Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem erfolgen kann. Den Abschluss von Kapitel 4 bilden die Erläuterung der Anwendungsmöglichkeiten und Restriktionen der entwickelten Werkzeuge sowie eine Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte dieses Kapitels.

### **4.1 Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von hybriden Produktionssystemen**

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Einflussfaktoren, welche die Wirtschaftlichkeit eines hybriden Produktionssystems bestimmen und die Ausgangsbasis zur Modellentwicklung bilden, erarbeitet. Dazu erfolgt zunächst eine allgemeine Einführung in die Definition und Messung dieser.

Die Wirtschaftlichkeit eines Produktionssystems wird in der vorliegenden Arbeit auf Basis des Zielsystems der Produktionslogistik nach Wiendahl abgeleitet. Dabei definiert sich diese über die Logistikleistung und Logistikkosten des betrachteten Systems (siehe dazu Abbildung 56).



**Abbildung 56: Zielsystem der Produktionslogistik<sup>565</sup>**

Die Logistikleistung eines Produktionssystems bezeichnet den Output eines Produktionssystems, welcher die bedarfsgerechte Bereitstellung von Gütern für den Endverbraucher repräsentiert.<sup>566</sup> Dabei spricht man von der wirkungsbezogenen Logistikleistung, deren Definitionsmaßstab der externe bzw. interne Kunde und dessen Anforderungen an die Ergebnisse des Logistiksystems sind.<sup>567</sup> Generell kann die Differenzierung der Logistikleistung eines Produktionssystems je nach Wirkungsfeld in eine interne und externe Leistung erfolgen: Die interne Logistikleistung (auch Innenlogistikleistung genannt) umfasst dabei sämtliche Aktivitäten der Planung, Steuerung, Durchführung und Kontrolle des Material- und Informationsflusses innerhalb des Systems Unternehmung. Dazu zählen die Kundenauftragsabwicklung, die Beschaffung und Disposition sowie das Lager- und Transportwesen. Die eigentliche Logistikleistung wiederum besteht in der Veränderung von Raum, Zeit und Menge, wie beispielsweise Transport- und Lagerleistungen.<sup>568</sup> Der Aufwand, welcher zur Erbringung der logistischen Leistungen notwendig ist, wird in der Kosten- und Leistungsrechnung des Unternehmens dargestellt. Dem gegenüber steht die externe Logistikleistung (auch Außenlogistikleistung genannt). Diese bezeichnet die Wirkungen der Leistungserbringung aus Sicht des Kunden. Diesen interessiert vor allem, ob die Vorgaben bzw. seine Erwartungen insbesondere bezüglich des Faktors Zeit eingehalten bzw. erfüllt werden können. Die marktorientierte externe Logistikleistung wird durch den so genannten Servicegrad charakterisiert. Dieser definiert sich als Ergebnis der Verknüpfung interner Einzelleistungen, so wie diese durch den Kunden empfunden werden.<sup>569</sup> Die Bewertung des Servicegrades kann u.a. durch die Komponenten Lieferzeit, Lieferfähigkeit,

<sup>565</sup> Wiendahl (2006), S. 155.

<sup>566</sup> Vgl. Koether (2000), S. 178.

<sup>567</sup> Vgl. Heß (2006), S. 380 zitiert nach Gollwitzer.

<sup>568</sup> Vgl. Pallewek (2007), S. 31.

<sup>569</sup> Vgl. Pallewek (2007), S. 31 ff.

Liefertreue, Lieferqualität und der Informationsbereitschaft, welche nachfolgend kurz erläutert werden, erfolgen:<sup>570</sup>

*Lieferzeit:* Entspricht der Zeitspanne zwischen der Auftragserteilung und dem Liefertermin eines Auftrags.

*Lieferfähigkeit:* Bezeichnet die Übereinstimmung zwischen dem Kundenwunschtermin und dem zugesagten Liefertermin.

*Liefertreue:* Gibt die Übereinstimmung zwischen dem zugesagten und dem tatsächlichen Liefertermin an.

*Lieferqualität:* Entspricht dem Anteil an fehlerfrei, wobei fehlerfrei beispielweise die richtigen Produkte, am richtigen Ort, in der richtigen Qualität, in der richtigen Menge und zur richtigen Zeit bedeutet, ausgeführten Aufträgen bzw. Auftragspositionen in einem definierten Betrachtungszeitraum.

*Informationsbereitschaft:* Ist das Maß für die Fähigkeit eines Unternehmens einem Kunden (jederzeit) die ihn interessierenden Informationen bereitzustellen.

Die Logistikleistung nach Wiendahl wird durch die vom Kunden wahrgenommenen logistischen Zielgrößen Liefertreue und Lieferzeit bestimmt bzw. gemessen. Die Zielgrößen Lieferfähigkeit, Lieferqualität und Informationsbereitschaft finden im Zielsystem der Produktionslogistik keine direkte Berücksichtigung, da diese nicht durch produktionslogistische Maßnahmen unmittelbar beeinflussbar sind. Die Liefertreue bzw. Termintreue gibt dabei die Übereinstimmung zwischen zugesagtem und tatsächlichem Liefertermin bzw. Fertigstellungstermin eines Kundenauftrags an. Die Lieferzeit entspricht wie oben definiert der Zeitspanne zwischen der Auftragserteilung und dem Liefertermin eines Auftrags.<sup>571</sup> Äquivalent dazu kann für die Produktion die Durchlaufzeit als die Zeitspanne von der Auftragseinlastung in das Produktionssystem bis zur Fertigstellung des Auftrags in einer definierten Messstrecke gesehen werden. Aus produktionslogistischer Sicht sollte eine möglichst hohe Termintreue sowie eine kurze Durchlaufzeit erzielt werden.

Die Logistikleistung ist, neben den Logistikkosten und der Flexibilität, eines der Logistikziele eines Produktionssystems (siehe dazu Abbildung 57).

---

<sup>570</sup> Vgl. Heß (2006), S. 379.

<sup>571</sup> Vgl. Wiendahl (2006), S. 155.

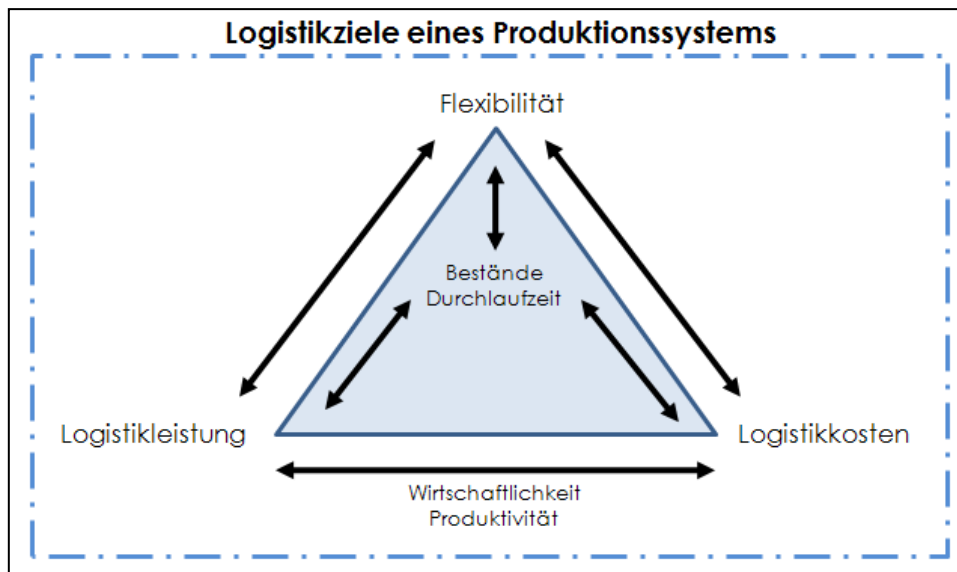


Abbildung 57: Logistikziele eines Produktionssystems<sup>572</sup>

Die Produktivität bzw. die Wirtschaftlichkeit vermitteln gemäß dem ökonomischen Prinzip den Bezug zwischen Leistung und den dadurch entstehenden Kosten. Dabei bezeichnet das Verhältnis des erbrachten Outputs zum eingebrachten Input eines Produktionsprozesses in realen Größen (Mengenangaben) die Produktivität (siehe dazu Gleichung 61) eines Produktionssystems und in mit Preisen bewerteten monetären Größen die Wirtschaftlichkeit (siehe Gleichung 62) des betrachteten Systems.<sup>573</sup>

*Produktivität (mengenmäßige oder technische Wirtschaftlichkeit)*

$$= \frac{\text{Menge an Einsatzmitteln [ME]}}{\text{erzielte Ergebnisse [ME]}} \quad (\text{Gleichung 61})$$

*Wirtschaftlichkeit (wertmäßige Wirtschaftlichkeit)*

$$= \frac{\text{wertmäßiger Mitteleinsatz [GE]}}{\text{wertmäßige Erlöse [GE]}} \quad (\text{Gleichung 62})$$

wobei

*ME* Mengeneinheiten

*GE* Geldeinheiten

Der Flexibilität, worunter man die Fähigkeit logistischer Prozesse auf Veränderungen im wirtschaftlichen Umfeld zu reagieren und Prozessketten auf neue wirtschaftliche Chancen und Risiken anzupassen und nachhaltig zu verbessern versteht, kommt im Rahmen der ganzheitlichen Betrachtung eine erhebliche Bedeutung zu. Um als Unternehmen heutzutage wettbe-

<sup>572</sup> In Anlehnung an Heß (2006), S. 379.

<sup>573</sup> Siehe dazu Töpfer (2007), S. 62.

werbsbeständig zu sein, muss die Reaktionsfähigkeit und Agilität, d.h. die Veränderungsfähigkeit und -schnelligkeit des Logistiksystems zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden.<sup>574</sup>

Dem gegenüber stehen die vom Unternehmen beeinflussbaren Logistikkosten, welche sich aus den Herstellkosten eines Produkts oder Auftrags sowie den Kapitalbindungskosten zusammensetzen. Dabei werden die Herstellkosten aus den Einzel- und Gemeinkosten für das Material und die Fertigung sowie den Sondereinzelkosten der Fertigung gebildet. Die Kapitalbindungskosten bezeichnen den monetär bewerteten Bestand an Halb- und Fertigerzeugnissen und mindern den Cash Flow und damit die Investitionsfähigkeit eines Unternehmens.<sup>575</sup>

Im Anschluss erfolgt nun in den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 die spezifische Betrachtung der Zielgrößen der Logistikleistung und Logistikkosten eines hybriden Fertigungssystems, wobei die im Nachfolgenden erläuterten Faktoren auf Basis einer Literaturrecherche und mittels Expertenbefragungen identifiziert werden konnten (siehe dazu Anhang D, S. 292 ff.).

#### 4.1.1 Zielgrößen der Logistikleistung

Die Logistikleistung eines Produktionssystems nach Wiendahl wird im Allgemeinen wie bereits erwähnt durch die beiden logistischen Zielgrößen Termintreue und Durchlaufzeit repräsentiert. Für die Beurteilung der Logistikleistung eines hybriden Produktionssystems wird das bestehende Zielsystem der Produktionslogistik (siehe Abbildung 58) um die Zielgrößen Produktmix und Produktionslos erweitert. Wie bereits im Abschnitt 3.4.2 angesprochen wurde, ist die Ergänzung des Zielsystems um die Zielgrößen Produktmix, welcher aus Sicht der Produktionsplanung und -steuerung möglichst konstant sein sollte und der Zielgröße Produktionslos, welches möglichst groß sein sollte, im Hinblick auf die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines hybriden Produktionssystems notwendig, da sowohl der Produktmix als auch die Produktionslosgrößenwahl diese maßgeblich beeinflussen und daher Berücksichtigung finden müssen.

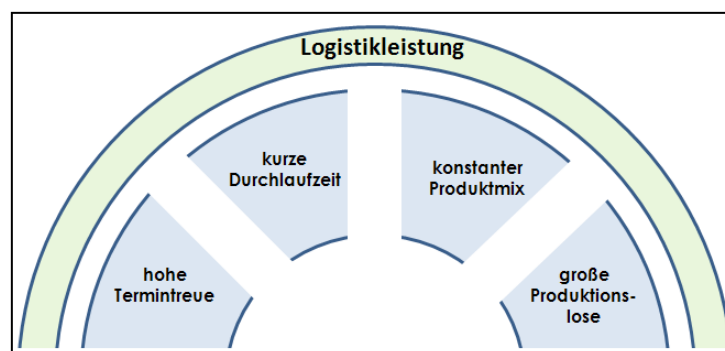


Abbildung 58: Zielgrößen der Logistikleistung eines hybriden Produktionssystems<sup>576</sup>

<sup>574</sup> Vgl. Koether (2006), S. 384 f.

<sup>575</sup> Vgl. Wiendahl (2006), S. 155.

<sup>576</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Somit wird die Logistikleistung eines hybriden Produktionssystems in dieser Arbeit durch die vier Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeit, Produktmix und Produktionslos beschrieben, auf welche nachfolgend im Detail eingegangen wird:

### 1. Hohe Termintreue:

Hybride Produktionssysteme unterliegen wie Produktionssysteme im Allgemeinen dem Ziel, dass die zu produzierenden Güter möglichst termingetreu, d.h. zu dem mit dem Kunden vereinbarten bzw. festgelegten Termin hergestellt bzw. geliefert werden sollen.<sup>577</sup> Gerade die Termintreue spiegelt sich direkt im Umsatz eines Unternehmens wieder, da nicht eingehaltene Liefertermine zu Erlösschmälerungen führen können. Die Erlösrechnung geht vom Bruttoerlös aus, welcher sich aus der abgesetzten Menge eines Produkts je Leistungsart und dem Verkaufspreis errechnet.<sup>578</sup> Die Nettoerlöse, denen kein Produktionsfaktoreinsatz zugrunde liegt und sich ähnlich wie Kosten verhalten, stellen dabei die um die Erlösschmälerungen korrigierten Bruttoerlöse eines Produkts oder Auftrags dar. Dabei kann zwischen von *Zahlungsbedingungen und Mengen abhängigen Erlösschmälerungen* oder vom *Eintritt bestimmter Risiken abhängigen Erlösschmälerungen* unterschieden werden: Zu ersteren zählen u.a. Kundenskonti, auftragsgrößenabhängige Rabatte, Abnehmerrabatte und sonstige Rabatte, letztere umfassen etwaige Preisnachlässe, Gutschriften und Schadensersatzforderungen.<sup>579</sup> Das Nichteinhalten von Lieferterminen resultiert oftmals im Auftreten von *Verspätungs-* oder auch *Folgekosten*. *Verspätungskosten* bezeichnen dabei jene Kosten, welche dem Unternehmen aufgrund des verspäteten Auslieferens eines Auftrags wie beispielsweise Konventionalstrafen oder zusätzlichen Kosten für notwendige Expressauslieferungen entstehen.<sup>580</sup> Resultiert jedoch die verspätete Anlieferung beim Kunden in Leerzeiten aufgrund von Auslastungsverlusten oder tritt sogar der Stillstand einer Anlage ein, so können aufgrund des resultierenden Schadens seitens des Kunden *Folgekosten* entstehen, welche meist ein Vielfaches des eigentlichen Produkt- oder Auftragswertes darstellen.<sup>581</sup> *Folgekosten* entstehen aber auch dann, wenn durch die Verspätung der Produkt- oder Auftragslieferungen in weiterer Folge auch die Termintreue des Kunden negativ beeinflusst wird, da dieser aufgrund des fehlenden Materials dessen Kunden nicht termingerecht beliefern kann.<sup>582</sup> Gerade moderne Anlieferungskonzepte wie Just-in-Time (JIT) oder Just-in-Sequence (JIS), welche eine Reduzierung an Beständen in der Lieferkette anstreben, sind besonders anfällig gegenüber einer nicht termingerechten Anlieferung und können in hohen Strafpönalen oder Preisnachlässen bei mangelnder Termintreue resultieren.<sup>583</sup> Lieferterminverspätungen bewirken jedoch erst dann Erlösschmälerungen, wenn die zu produzierenden Erzeugnisse direkt an einen externen Kunden gehen oder die

---

<sup>577</sup> Vgl. Nyhuis et al. (2003), S. 127 f.

<sup>578</sup> Vgl. Plinke (1997), S. 215.

<sup>579</sup> Vgl. Hoitsch et al. (2007), S. 212 f.

<sup>580</sup> Vgl. Lödding (2008), S. 37.

<sup>581</sup> Vgl. Lödding (2008), S. 26.

<sup>582</sup> Vgl. Lödding (2008), S. 27.

<sup>583</sup> Vgl. Koffler (1987), S. 30.

der problematischen Fertigungsstufe nachgelagerten Produktionsstufen oder -systeme die Verspätungen nicht mehr ausgleichen können. Weitaus schwieriger bewertbar bzw. direkt erfassbar sind die Auswirkungen mangelnder Termintreue hinsichtlich der Kundenbindung. Durch das Nichteinhalten eines zugesagten Liefertermins kann das Vertrauensverhältnis zum Kunden stark beeinträchtigt werden, was im schlimmsten Fall zum Bruch der bestehenden Geschäftsbeziehung führen kann und das Abwandern des Kunden zur Konkurrenz bedingt.<sup>584</sup> Die dadurch entstehende negative Reputation des Kunden kann in weiterer Folge auch die Geschäftsbeziehungen zu anderen Kunden beeinflussen, weshalb gerade dieser Tatsache vermehrt Beachtung gewidmet werden muss. Nicht nur, dass das Unternehmen durch die Abwanderung von Kunden mit entgangenen Deckungsbeiträgen rechnen muss, vielmehr kann dadurch die Wettbewerbsfähigkeit am Markt stark gefährdet werden. Ziel muss es daher sein, eine möglichst hohe Liefertreue zu erreichen um somit die Kundenbindung stärken zu können.<sup>585</sup>

## 2. Kurze Durchlaufzeit:

Die Durchlaufzeit eines Produkts oder Auftrags durch die Produktion stellt eine weitere Zielgröße der Logistikleistung eines hybriden Produktionssystems dar. Eine kurze bzw. reduzierte Durchlaufzeit bewirkt einen höheren Durchsatz von Produkten bzw. Aufträgen durch das Produktionssystem und resultiert, vorausgesetzt dass die zusätzlichen Produkte auch am Markt abgesetzt werden können, in einer Steigerung des Unternehmensumsatzes und wirkt sich somit positiv auf den Unternehmenserfolg aus. Die Durchlaufzeit lässt sich basierend auf dem REFA-Schema in die folgenden Komponenten gliedern (siehe dazu Abbildung 59):

|                     |          |               |           |               |            |
|---------------------|----------|---------------|-----------|---------------|------------|
| Gesamtdurchlaufzeit |          |               |           |               |            |
| Plandurchlaufzeit   |          |               |           |               | Zusatzzeit |
| Belegungszeit       |          | Übergangszeit |           |               | Zusatzzeit |
| Bearbeitungszeit    | Rüstzeit | Wartezeit     | Liegezeit | Transportzeit | Zusatzzeit |

Abbildung 59: Komponenten der Durchlaufzeit nach REFA-Schema<sup>586</sup>

Die Gesamtdurchlaufzeit setzt sich dabei aus der Plandurchlaufzeit und der Zusatzzeit, welche durch nicht planmäßige Tätigkeiten wie beispielsweise die Nacharbeit bei Ausschuss oder durch störungsbedingte Ausfälle entsteht, zusammen. Die Plandurchlaufzeit lässt sich in die Belegungs- und Übergangszeit unterteilen: Die Belegungszeit umfasst die Durchführung der eigentlichen Arbeiten an den Erzeugnissen, während die Übergangszeit jene Arbeiten beinhaltet, die in keinem direkten Zusammenhang mit der Bearbeitung stehen. Bei der Belegungszeit kann zwischen der Bearbeitungs- und Rüstzeit differenziert werden: Die Bearbeitungszeit

<sup>584</sup> Vgl. Lödding (2008), S. 27.

<sup>585</sup> Vgl. Weber (2002), S. 104.

<sup>586</sup> In Anlehnung an REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (1993), S. 15 ff.

bezeichnet in der Produktionswirtschaft die Zeit für einen Arbeitsgang, wobei ein Arbeitsgang als der „... zur Erfüllung einer Arbeitsaufgabe ausgerichtete Arbeitsablauf innerhalb eines Arbeitssystems, bei dem eine Mengeneinheit eines Auftrages erzeugt wird...“<sup>587</sup>, definiert ist. Die Rüstzeit ist definiert als die Zeitspanne vom letzten Gutteil eines Produktions- oder Auftragsloses bis zum ersten Gutteil des Folgeloses bei geplanter Prozessgeschwindigkeit.<sup>588</sup> Die Übergangszeit setzt sich aus den Anteilen der Warte-, Liege- und Transportzeit zusammen. Die Wartezeit beschreibt dabei jene Zeiten, während dessen ein Auftrag aufgrund fehlender Teile oder Materialien, aufgrund von Maschinenstillständen oder da sich gerade ein anderer Auftrag in Bearbeitung findet, warten muss. Die technologischen Liegezeiten hingegen resultieren aus den dem Herstellungsprozess zugrundeliegenden verfahrensspezifischen Vorschriften und Technologien und tragen wertschöpfend zum Produktionsprozess bei. Die Transportzeit entspricht der Dauer aller Vorgänge, die für den Transport der Teile und Materialien zwischen zwei Arbeitsplätzen, zwischen Arbeitsplatz und Lager u.a. anfallen.<sup>589</sup> Bei der Gestaltung bzw. Festlegung der Produktionsablaufplanung lassen sich nicht alle Komponenten der Durchlaufzeit beeinflussen, da die Bearbeitungszeiten und die technologischen Liegezeiten festen Vorgaben unterliegen und nur durch die Änderung der zugrundeliegenden Fertigungstechnologien bzw. den Einsatz neuer Maschinen, welche eine schnellere Bearbeitung ermöglichen, beeinflussbar sind. Hingegen können die Warte-, Transport- und Rüstzeiten sehr wohl aus produktionslogistischer Sicht beeinflusst werden: So kann durch die Bestimmung der geeigneten Produktionslosgröße und Reihenfolge eine positive Beeinflussung des reihenfolgeabhängigen Anteils der Rüstzeit erzielt werden, durch eine Verbesserung des innerbetrieblichen Transportes eine Reduzierung der Transportzeiten erreicht, und durch die Harmonisierung der Auftragsstaktung bzw. Auftragsabarbeitung auf den unterschiedlichen Aggregaten eines Produktionssystems eine „Glättung des Materialflusses“ und somit eine Minimierung der Wartezeiten angestrebt werden. Kurze Durchlaufzeiten wirken sich neben der bereits erwähnten Steigerung des Durchsatzes auch positiv auf die Liefer- bzw. Produktionsflexibilität eines Unternehmens aus. Die Liefer- bzw. Produktionsflexibilität zielt auf die rasche Anpassung an ungeplante bzw. nicht vorhersehbare Veränderungen des Umfeldes bzw. auf die schnelle Reaktion auf Kundenwünsche und -bedürfnisse wie beispielsweise die Einhaltung eines kurzfristigen Wunschliefertermins oder die Realisierung eines Sonderauftrages ab.<sup>590</sup> Durch eine hohe Liefer- bzw. Produktionsflexibilität können nicht prognostizierte Marktchancen genützt und die Kundenbindung gestärkt werden.

### **3. Konstanter Produktmix:**

Ein weiterer Parameter, welche mitunter die Wirtschaftlichkeit eines hybriden Produktionssystems beeinflusst und maßgeblich die Logistikleistung dieses Systems bestimmt, ist der Pro-

---

<sup>587</sup> REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (1993), S. 195.

<sup>588</sup> Vgl. Lunau et al. (2007), S. 203.

<sup>589</sup> Vgl. Gollwitzer (2008), S. 112 f.

<sup>590</sup> Vgl. Pieper (2008), S. 4.



duktmix, welchen es zu erzeugen gilt. Der Produktmix wird in dieser Arbeit als die Menge an unterschiedlichen Produkten hinsichtlich Qualität und Dimensionen pro Produktionsintervall verstanden, welcher auf einem Aggregat zu fertigen ist. Als konstant wird dieser bezeichnet, wenn eine geringe Anzahl unterschiedlicher herzustellender Erzeugnisse hinsichtlich Qualität und Dimensionen in einem Produktionsintervall auftritt. Je nachdem wie konstant bzw. welchen Schwankungen die Nachfrage bezogen auf die Produktart und -menge seitens des externen Kunden ist bzw. unterliegt, desto stärker ist der Unternehmensbereich der Produktion davon betroffen. Hohe Schwankungen im Produktionsprogramm führen zu einer Erhöhung der Produktionskomplexität sowohl in der Planung als auch in der Steuerung.<sup>591</sup> Aus produktionslogistischer und unternehmensinterner Sicht sollte daher der Produktmix so konstant wie möglich sein. Besonders davon betroffen sind hybride Produktionssysteme, für welche die Koordination einer Vielzahl von kleinen variantenspezifischen Aufträgen eine besondere Herausforderung darstellt: Zum einen kommt es dadurch zu einem Anstieg des Umstellaufwands bzw. den damit verbundenen Kosten für Umstell-, Rüst-, Einstell- und Justiervorgänge und damit zu einer Erhöhung der Leerkosten der Aggregate, zum anderen sinken die Kostenreduktionspotenziale aufgrund der ausbleibenden Fixkostendegression (siehe dazu ausführlich S. 155 f.). Generell kann davon ausgegangen werden, dass je stärker der zu erzeugende Produktmix variiert, desto eher muss mit höheren Durchlaufzeiten, Beständen und Herstellkosten gerechnet werden.<sup>592</sup> Eine weitere Problematik ergibt sich in der Anwendung verbrauchsorientierter Steuerungsprinzipien, da diese bei einer hohen Variantenvielfalt nur bedingt anwendbar sind, da deren erfolgreicher Einsatz eine annähernd standardisierte Produktion mit relativ konstanten Verbrauchsverläufen voraussetzt bzw. verlangt.<sup>593</sup> Weiters können Fehlkosten aufgrund des Anstiegs an Ausschuss oder Nacharbeit von fehlerhaften Teilen, bedingt durch eine Vielzahl von Umstellungen, resultieren.<sup>594</sup> Als weitere Zielgröße kann daher ein möglichst konstanter Produktmix identifiziert werden.

#### **4. Große Produktionslose:**

Die vierte Zielgröße der Logistikleistung eines hybriden Produktionssystems stellt die Produktionslosgröße dar. Ziel sollte es sein diese so groß wie möglich zu gestalten bzw. sollte die Bestimmung bzw. Begrenzung derer im Wesentlichen auf Basis der Kapazitätsgrenzen der Aggregate erfolgen. In der Regel gilt, dass größere Produktionslose die Erzeugung bzw. Realisierung der Produktionsaufträge mit einer geringeren Anzahl an Umstellungen ermöglichen, während die Produktion kleinerer Produktionslose in der Regel in einem Anstieg der Rüst- und Umstellvorgänge und somit in einer höheren Durchlaufzeit und steigenden Herstellkosten resultiert. Jedoch nimmt die Flexibilität eines Produktionssystems mit zunehmender Losgröße ab, was eine kurzfristige Einlastung von zusätzlichen bzw. ungeplanten Aufträgen erschwert. Um

<sup>591</sup> Vgl. Große-Heitmeyer et al. (2004), S. 10.

<sup>592</sup> Vgl. Wildemann (2000), S. 55.

<sup>593</sup> Vgl. Heina (1999), S. 24.

<sup>594</sup> Vgl. Wildemann (2003), S. 79.

eine möglichst hohe Flexibilität in der Produktion zu erreichen sollte daher ein Single-Piece-Flow bzw. eine Losgröße von eins angestrebt werden. Auf eine detaillierte Betrachtung des Einflusses der Produktionslosgröße wird an dieser Stelle verzichtet und auf Abschnitt 4.2 verwiesen.

#### 4.1.2 Zielgrößen der Logistikkosten

Im Nachfolgenden werden analog zur Logistikleistung die Zielgrößen der Logistikkosten eines hybriden Produktionssystems definiert und erläutert.

Die bestehenden Größen der Logistikkosten, d.h. die Auslastung eines Systems und der Bestand an Halb- und Fertigerzeugnissen, werden für die Betrachtung eines hybriden Produktionssystems um die Zielgrößen Umstellaufwand und Anlagenverfügbarkeit erweitert. Der Umstellaufwand, welcher als Maß zur Beschreibung der Umstell-, Einstell-, Rüst- und Justiervorgänge herangezogen wird, sollte um eine wirtschaftliche Produktion sicherstellen zu können, möglichst gering sein. Dies kann mitunter durch eine geeignete Abstimmung der Losgrößen- und Auftragsreihenfolgeplanung realisiert werden. Als weitere Zielgröße wird die Anlagenverfügbarkeit betrachtet: Wie bereits in Abschnitt 3.4.2 erläutert, sind hybride Produktionssysteme mitunter durch den Einsatz kapitalintensiver Aggregate gekennzeichnet, was zur Folge hat, dass der Anlagenverfügbarkeit hohe Aufmerksamkeit zukommt. Steht eine Anlage beispielsweise aufgrund von Wartungs- oder Reparaturarbeiten still bzw. ist diese aufgrund fehlerhafter Planungen nur bedingt einsetzbar/belegt, wirkt sich dies unmittelbar auf die Auslastung eines Systems aus und schlägt sich in einer Erhöhung der Produktionskosten nieder. Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Zielgrößen (siehe dazu Abbildung 60) erfolgt im Anschluss:

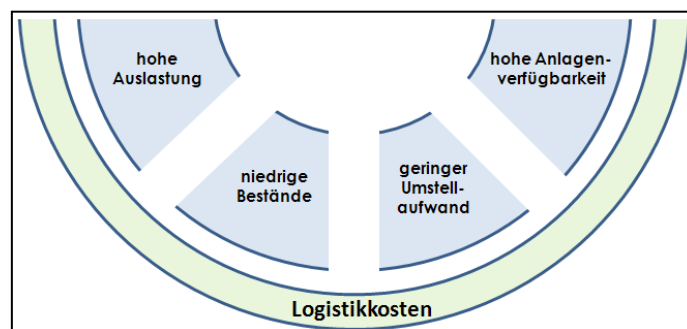


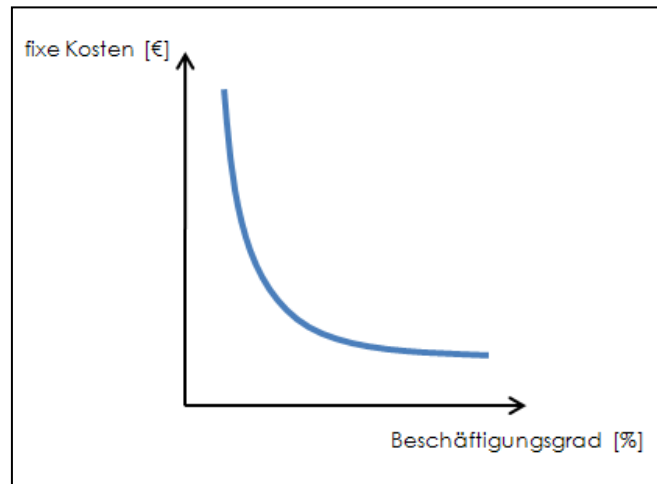
Abbildung 60: Zielgrößen der Logistikkosten eines hybriden Produktionssystems<sup>595</sup>

#### 5. Hohe Auslastung:

Zum einen sollte ein hybrides Produktionssystem wie Produktionssysteme im Allgemeinen eine hohe Auslastung aufweisen. Da hybride Produktionssysteme meist kapitalintensive Anlagen beinhalten, welche mit hohen Anschaffungsausgaben und somit mit hohen Abschreibungs-

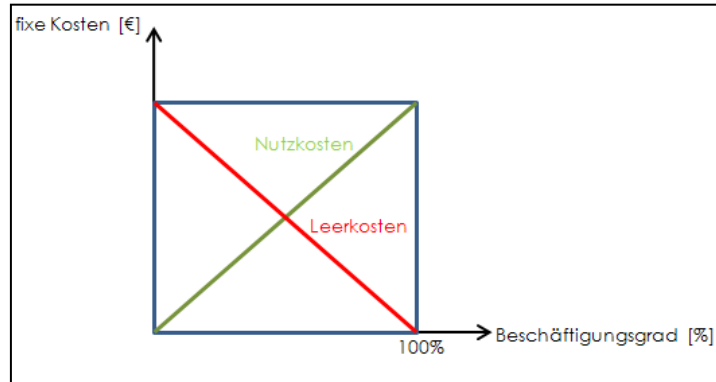
<sup>595</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

und Betriebskosten verbunden sind, kann durch einen höheren Beschäftigungsgrad eine Fixkostendegression (siehe dazu Abbildung 61) erzielt werden, wodurch die fixen Kosten auf eine höhere Anzahl an Kostenträgern verteilt werden und somit die fixen Kosten je Stück bzw. Mengeneinheit degressiv fallen.<sup>596</sup>



**Abbildung 61: degressiver Fixkostenverlauf bei zunehmendem Beschäftigungsgrad<sup>597</sup>**

Neben dem degressiven Fixkostenverlauf kann bei zunehmendem Beschäftigungsgrad auch eine Minimierung der Leerkosten bzw. eine Maximierung der Nutzkosten erzielt werden (siehe dazu Abbildung 62).



**Abbildung 62: Leer- und Nutzkosten<sup>598</sup>**

Als Leerkosten bezeichnet man jenen Anteil der fixen Kosten, welcher auf ungenützte Kapazitäten entfällt.<sup>599</sup> Die Nutzkosten stellen dabei die Nutzung des eingesetzten Kapitals dar und spiegeln sich in der Kapitalproduktivität wieder (Gleichung 63).<sup>600</sup>

$$\text{Kapitalproduktivität} = \frac{\text{Wertschöpfung}}{\text{Sachanlagevermögen}} \quad (\text{Gleichung 63})$$

<sup>596</sup> Vgl. Freidank (2007), S. 38.

<sup>597</sup> In Anlehnung an Freidank (2007), S. 38.

<sup>598</sup> In Anlehnung an Plinke (1997), S. 165.

<sup>599</sup> Vgl. Thommen (2004), S. 400.

<sup>600</sup> Vgl. Preißler (2008), S.118.

Die Maximierung des Nutzens des eingesetzten Kapitals bewirkt zwar keine Senkung der fixen Kosten an sich, jedoch können dadurch die Leerkosten gesenkt werden, wodurch eine Fixkostendegression eintritt. Dies hat wiederum zur Folge, dass die fixen Kosten je Stück und somit die gesamten Stückkosten verringert werden. Für das Unternehmen resultiert dies wiederum in der Möglichkeit sich am Markt durch einen niedrigeren Stückpreis von der Konkurrenz abzugrenzen und somit eine Kostenführerschaft zu erreichen oder durch den Verkauf der Produkte einen höheren Gewinn zu erzielen.<sup>601</sup>

## **6. Niedrige Bestände:**

Eine weitere wesentliche Zielgröße stellen die Bestände dar. Wie bereits bei der Diskussion zur Durchlaufzeit kurz angeführt wurde, kann eine Minimierung der Wartezeiten der Aufträge zu einer Bestandssenkung führen. Dies betrifft sowohl den Fertigungsbestand, welcher auf den nächsten Bearbeitungsschritt wartende Aufträge beinhaltet als auch den Bestand an Fertigfabrikaten, welche auf die Auslieferung an den Kunden warten. Die Bestände an Halb- und Fertigfabrikaten stellen gebundenes Kapital dar, welches die Liquidität und damit die Investitionsbereitschaft bzw. -möglichkeit eines Unternehmens schmälern.<sup>602</sup> Geringe Bestände bewirken eine Erhöhung des Umlaufvermögens eines Unternehmens was wiederum in einem Anstieg des Kapitalumschlags resultiert.<sup>603</sup> Weiters geht mit der Reduzierung an Beständen eine Senkung der daraus resultierenden Bestandskosten, welche sich aus den Personalkosten, Lagerhaltungskosten, Kosten für Fördermittel, den Zinskosten für die auf Lager liegenden Teile und aus den kalkulatorischen Kosten für Verderb, Schwund und Qualitätsminderung zusammensetzen, einher.<sup>604</sup> Die Reduzierung an Beständen wirkt sich im Besonderen auf die Zinskosten aus, welche für das in den Beständen gebundene Kapital zu tragen sind. Diese ermöglichen aufgrund der Tatsache, dass bei einem konstanten Zinssatz eine proportionale Kapitalbindung angenommen werden kann, eine deutliche Erhöhung des Gewinns, da in der Regel davon ausgegangen werden kann, dass der prozentuelle Gewinnanteil eines Unternehmens meist höher ist als die daraus resultierende Kostensenkung. Somit kann durch die Reduzierung der bestandsbedingten Kosten ein höherer Gewinn und damit eine Steigerung der Umsatzrendite erzielt werden.<sup>605</sup> Ein weiterer Aspekt, welcher mit der Reduzierung an Beständen einhergeht, ist die Senkung der benötigten Lagerflächen. Da hybride Produktionssysteme in der Regel meist einen großen Bedarf an Lagerflächen aufweisen (siehe dazu Abschnitt 3.4.2) kann durch eine bestandsarme Produktion eine Minimierung dieser angestrebt werden.<sup>606</sup> Gerade Unternehmen, welchen eine (sehr) begrenzte Lagerkapazität zur Verfügung steht, können durch eine bestandsarme Produktion Lagerengpässe ausgleichen bzw. diese dadurch vermieden werden. Hingegen bewirkt ein höheres Bestandsniveau in der Regel eine Senkung

---

<sup>601</sup> Vgl. Klodt et al. (2003), S. 49.

<sup>602</sup> Vgl. Pieper (2008), S. 1.

<sup>603</sup> Vgl. Dombrowski et al. (2008), S. 26.

<sup>604</sup> Vgl. Gollwitzer et al. (1998), S. 87.

<sup>605</sup> Vgl. Dombrowski et al. (2008), S. 86.

<sup>606</sup> Vgl. Lödding (2008), S. 33.

der Rüstzeit, da im Zuge der Losgrößen- bzw. Reihenfolgeplanung eine effizientere Bündelung an Aufträgen, durch welche die Reduzierung der Rüstvorgänge erreicht wird, vorgenommen werden kann.<sup>607</sup> Ein niedriges Bestandsniveau hat die Zusammenfassung der Aufträge in kleineren Losen zur Folge, womit aber die Anzahl an Rüstvorgängen und somit auch die Auftragswechselkosten (im Wesentlichen die Rüstkosten) steigen. Kleine Lose wiederum erhöhen aber auch die Flexibilität der Fertigung, welche als eine der wesentlichen Zielindikatoren für die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens am Markt gesehen wird.<sup>608</sup> Je flexibler eine Produktion ist, desto eher kann auf Kundenwünsche und unerwartete Ereignisse reagiert werden.<sup>609</sup>

## 7. Geringer Umstellaufwand:

Eine weitere Zielgröße eines hybriden Produktionssystems stellt die Minimierung des Umstellaufwands, welcher als die Summe aller anfallenden Rüst-, Umstell-, Einstell- und Justiervorgänge definiert ist, dar. Die Reduzierung der Rüstvorgänge führt zu einer Senkung der Rüstkosten, wobei diese in direkte und indirekte Kosten differenziert werden können. Die direkten Rüstkosten beinhalten den unmittelbar auftretenden Faktorverbrauch für die Umrüstung zur Fertigung eines neuen Loses<sup>610</sup> und setzen sich dabei aus den dafür notwendigen Personal-, Material-, Werkzeug-, Transport- und Energiekosten zusammen.<sup>611</sup> Gerade in hybriden Fertigungssystemen, in welchen generell längere Rüstzeiten auftreten, können durch die Minimierung der Rüstvorgänge erhebliche Einsparungspotenziale realisiert werden. Die indirekten Rüstkosten bilden die während des Umrüstvorgangs und dem dadurch bedingten Stillstand eines Produktionsaggregats entstehenden Opportunitätskosten<sup>612</sup>, welche in einer Erhöhung der Leerkosten resultieren.<sup>613</sup> Da wie bereits im Vorhinein angeführt aufgrund des Einsatzes kapitalintensiver Anlagen eine Minimierung der Leerkosten angestrebt werden sollte, stellt gerade die Rüstzeit einen bedeutenden Hebel der Produktionsoptimierung dar. Durch die Reduzierung des Umstellaufwandes und der daraus resultierenden Senkung der Rüstvorgänge wird neben der Erreichung einer besseren Auslastung der Aggregate auch das investierte Kapital positiv beeinflusst. Durch die Reduzierung der Umstell-, Einstell- und Justiervorgänge wird in weiterer Folge auch die Senkung bzw. Vermeidung von Fehlmengenkosten in der Produktion erreicht. Fehlmengenkosten entstehen, wenn das Unternehmen die vertraglichen Lieferbedingungen zum einen nicht fristgerecht einhalten kann oder wenn andererseits nicht geplante, zusätzliche Kosten zur Erfüllung des Kundenauftrages (wie beispielsweise Lieferpönalen, Behebungskosten für Fehlmengensituationen) anfallen. Beide wirken sich unmittelbar in Erlösschmälerungen aus und stellen sowohl eine direkten Umsatzverlust wegen Liefer-

<sup>607</sup> Vgl. Missbauer (1998), S. 81.

<sup>608</sup> Vgl. Kaluza et al. (2004), S. 3.

<sup>609</sup> Vgl. Schuh (2006), S. 52 f.

<sup>610</sup> Vgl. Westphal (2001), S. 95.

<sup>611</sup> Vgl. Jahnke et al. (2006), S. 148.

<sup>612</sup> Vgl. Jahnke et al. (2006), S. 148 f.

<sup>613</sup> Vgl. Thommen (2004), S. 400.

terminverzügen als auch einen indirekten Umsatzverlust aufgrund der dadurch entstehenden negativen Reputation seitens der Kunden dar.<sup>614</sup> Durch die Minimierung des Umstellaufwands, im Speziellen der Einstell- und Justiervorgänge, lassen sich mitunter die variablen Fertigungskosten positiv beeinflussen. Durch die Senkung der Einstellungen und Justierungen können die durch die verschlechterte bzw. veränderte Produktqualität entstehenden notwendigen Nacharbeiten oder Ausschüsse minimiert werden, was in weiterer Folge in der Reduktion des damit verbundenen Verbrauchs an zusätzlichen Produktionsfaktoren (an Material und Personal) resultiert. Ebenso kann durch die Minimierung der Rüst- und Einstellvorgänge die Anlagennutzungszeit positiv beeinflusst werden, was in einer höheren Anlagenproduktivität resultiert.

### **8. Hohe Anlagenverfügbarkeit:**

Die letzte Zielgröße eines hybriden Produktionssystems stellt die Anlagenverfügbarkeit dar. Darunter versteht man die Wahrscheinlichkeit, dass eine Anlage zu einem bestimmten Zeitpunkt funktionsfähig und einsatzbereit ist.<sup>615</sup> Im Zusammenhang mit dem Einsatz in hybriden Produktionssystemen spielt vor allem auch die Zuverlässigkeit der eingesetzten Aggregate eine wesentliche Rolle. Nach DIN 40041 definiert sich die Zuverlässigkeit als „die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit ..., innerhalb der vorgegebenen Grenzen denjenigen durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen zu genügen, die an das Verhalten ihrer Eigenschaften während einer gegebenen Zeitdauer gestellt wird.“<sup>616</sup> Abgebildet wird die Anlagenverfügbarkeit in der Spitzenkennzahl der Overall Equipment Effectiveness (OEE), welche die Gesamtproduktivität einer Anlage angibt. Der OEE-Wert beschreibt dabei jenen Anteil an der geplanten Betriebszeit, welche sich aus der zur Verfügung stehenden Zeit abzüglich der geplanten Stillstände ergibt, in welchem die Anlage verlust- und störungsfrei arbeitet.<sup>617</sup> Dies impliziert, dass zur Erreichung einer wirtschaftlichen Produktion sowohl die Anlagenverfügbarkeit als auch der Leistungsgrad des Aggregats, welcher aus der Betriebszeit abzüglich der Zeiten für Leerläufe und Kurzstillstände resultiert, möglichst groß sein sollten.<sup>618</sup> Dies kann unter anderem durch die im Vorhinein angesprochene Minimierung des Umstellaufwandes realisiert werden.

Zusammengefasst ergibt sich das in der nachfolgenden Abbildung 63 dargestellte Zielsystem für hybride Produktionssysteme:

---

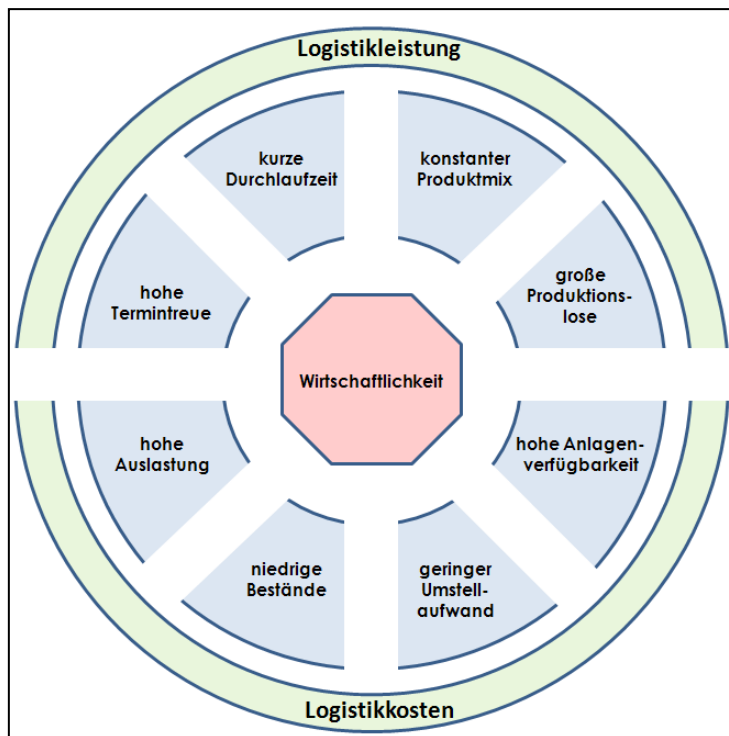
<sup>614</sup> Vgl. Weber (2002), S. 103 f.

<sup>615</sup> Vgl. Biedermann (2008), S. 39.

<sup>616</sup> DIN 40041:1990-12.

<sup>617</sup> Vgl. Nakajima (1995), S. 41 f.

<sup>618</sup> Vgl. Nakajima (1995), S. 43.



**Abbildung 63: Zielgrößen eines hybriden Produktionssystems<sup>619</sup>**

Dabei wird die Wirtschaftlichkeit durch die Logistikleistung, zu welcher die Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeit, der Produktmix und die Produktionslose gehören und den Logistikkosten, welche die Zielgrößen Auslastung, Bestand, den Umstell- aufwand und die Anlagenverfügbarkeit umfassen, bestimmt.

## 4.2 Auswirkungen der Produktionslosgrößen- und Reihenfol- gewahl auf die Logistikleistung und die Logistikkosten einer hybriden Produktion

Wie bereits im vorigen Abschnitt angeführt wird die Wirtschaftlichkeit eines hybriden Produkti- onssystems mitunter durch die Wahl der Produktionslosgröße und Reihenfolge beeinflusst. Ab- schnitt 4.2 beschäftigt sich nun im Detail mit dem Einfluss der Produktionslosgrößen- und Rei- henfolgewahl und dessen Auswirkungen auf die Zielgrößen eines hybriden Produktionssys- tems.

In der Regel gilt, dass die Produktionslosgröße möglichst groß sein sollte, um den Aufwand an bzw. die aus der gewählten Bearbeitungsfolge der Aufträge resultierenden Rüst-, Umstell-, Einstell- und Justiervorgänge so gering wie möglich zu halten. Durch die Bestimmung der „op- timalen“ Losgröße können die Anzahl an internen Rüstvorgängen während der Produktion und somit die direkten Rüstkosten, welche sich in einem höheren Zeitverbrauch und der dar- aus resultierenden Durchlaufzeiterhöhung sowie einem tendenziell vermehrten Materialein-

<sup>619</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

satz (in den Materialeinzelkosten abgebildet) niederschlagen, minimiert werden. Weiters kann durch die geeignete Wahl der Produktionslosgröße und Reihenfolge eine Harmonisierung in der Auftragsabarbeitung erzielt werden, was u.a. auch zu einer Glättung der Auslastung der Produktionsaggregate und somit in einer besser steuerbaren Taktung der Produktion resultiert.

Zu Beginn werden in Abschnitt 4.2.1 unterschiedliche Fälle der Losgrößenbestimmung in hybriden Produktionssystemen diskutiert. In den Abschnitten 4.2.2 und 4.2.3 erfolgt die Definition der Bewertungsparameter zur Bestimmung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge und deren Auswirkungen auf die Logistikleistung und die Logistikkosten, welche im entwickelten Bewertungsinstrumentarium in Abschnitt 4.2.4 Verwendung finden. In der daran anschließenden Diskussion (siehe Abschnitt 4.2.5) erfolgt die Betrachtung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen der Logistikleistung und Logistikkosten eines hybriden Produktionssystems.

#### **4.2.1 Produktionslosgrößen in hybriden Produktionssystemen**

Die Wahl der Produktionslos-/Chargengröße bzw. deren Einfluss auf die produktionslogistischen Zielgrößen und den dabei anfallenden Kosten unterscheidet sich dahingehend, ob es sich beim zugrunde liegenden Prozess um eine Stoffumwandlung oder eine Stoffumformung handelt, da je nachdem welche Art der Fertigung (Prozess- oder Fertigungsindustrie) vorliegt, andere Restriktionen und Vorgaben zur Bestimmung dieser entscheidend sind. Die im nachfolgenden angeführten Fälle, welche in der betrieblichen Praxis in hybriden Produktionssystemen auftreten können, wurden im Zuge von qualitativen Befragungen mit Verantwortlichen der Produktionsplanung in der Prozess- und Fertigungsindustrie<sup>620</sup> ermittelt.

*Produktionslose bei Stoffumwandlungsprozessen*

Bei der Bestimmung der Produktionslosgröße bzw. Chargengröße bei der Stoffumwandlung treten im Allgemeinen drei Fälle auf, welche zu differenzieren sind:

##### **Fall I: Bestimmung der Produktionslos- bzw. Chargengröße je Produktqualität durch die maximale Inputmenge der Aggregate**

Zunächst kann die Größe des Produktionsloses bzw. der Charge durch die maximale Kapazität der Fertigungsaggregate bestimmt (siehe dazu Abbildung 64) sein, welche die mögliche Inputmenge begrenzen.

Dies bedeutet, dass die Größe des Produktionsloses bzw. der Charge je Produktqualität durch den Input, d.h. die maximale Füllmenge eines Aggregats festgelegt ist. Dabei wird stets ein mengenmäßig konstantes Los/Charge je Produktqualität (bestimmt durch die Beschickung bzw. den Input des Aggregats) über ein betrachtetes Zeitintervall produziert. Dabei spricht man in der Praxis von einer Losgröße eins, welche bei-

---

<sup>620</sup> Befragte Personen und Unternehmen sind dem Lehrstuhl für Industriellistik bekannt.



spielsweise bei einem Elektrolichtbogenofen auftritt. Aus produktionslogistischer Sicht muss die Produktionslosgröße somit als konstant bzw. fest angenommen werden. Jedoch die Zeitdauer für die notwendigen Umstellungen als auch die Herstellungsdauer, welche durch produktionslogistische Maßnahmen kaum beeinflussbar sind, können je zu erzeugender Produktqualität stark variieren.

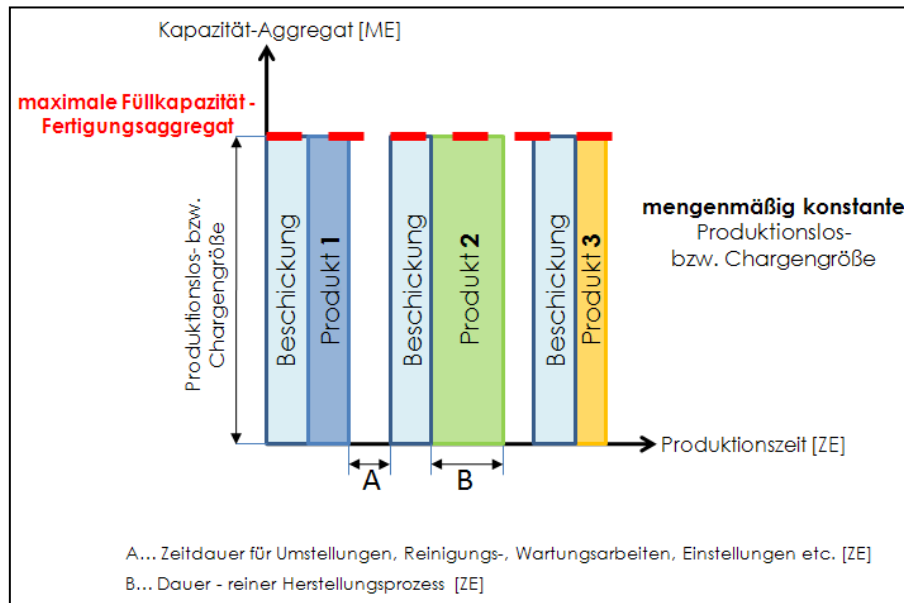


Abbildung 64: Bestimmung der Produktionslosgröße - Fall I<sup>621</sup>

**Fall II: Bestimmung der Produktionslos- bzw. Chargengröße (Kampagne) durch den kontinuierlichen, mengenmäßig variablen Output eines Aggregats je Produktqualität**

Des Weiteren kann die Produktions- oder Chargengröße durch den kontinuierlichen, mengenmäßig variablen Output je Produktqualität eines Fertigungsaggregats festgelegt bzw. bestimmt sein (siehe dazu Abbildung 65).

Beispielhaft tritt dies bei einer Sinteranlage in der Stahlindustrie oder bei einem Drehrohrföfen in der Grundstoffindustrie (Baustoff(Zement)- und Feuerfestindustrie) auf. Im Gegensatz zu der unter 1.) beschriebenen Situation wird hier kontinuierlich eine variable Menge an Output je Produktqualität (sogenannte Kampagne) bei gleichzeitiger Beschickung aus dem Fertigungsaggregat abgezogen. Die Umstellung von einer Produktqualität auf die nächste kann dabei, wie in Abbildung 65 mit der punktförmigen, blauen Linie angedeutet, auch fließend erfolgen.

<sup>621</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

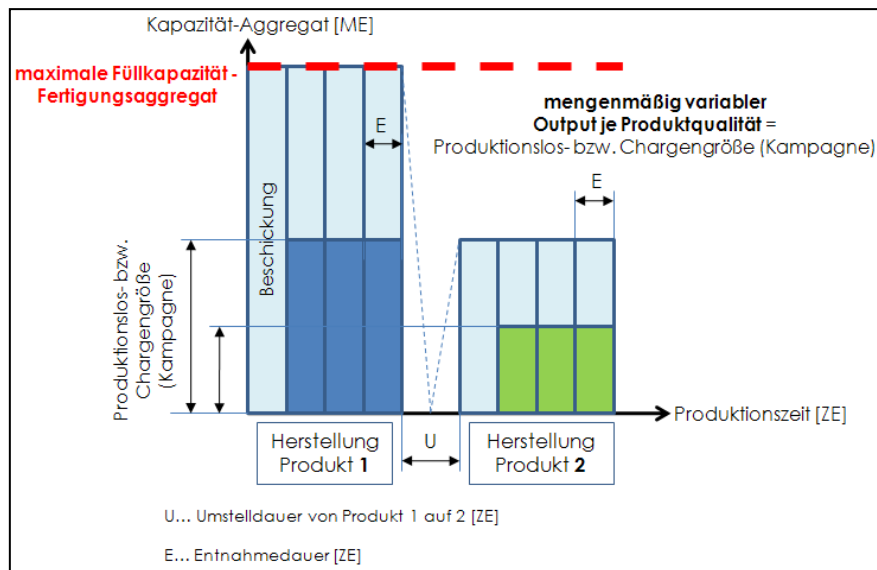


Abbildung 65: Bestimmung der Produktionslosgröße - Fall II<sup>622</sup>

**Fall III: Bestimmung der Produktionslos- bzw. Chargengröße je Produktqualität durch den Output eines Aggregats in konstanten Zeitabständen**

Zudem kann die Wahl der Produktionslos- bzw. Chargengröße durch den intervallmäßig konstanten Output des Fertigungsaggregats je Produktqualität beeinflusst werden (siehe dazu Abbildung 66). Dies tritt beispielhaft beim Abstich am Hochofen auf.

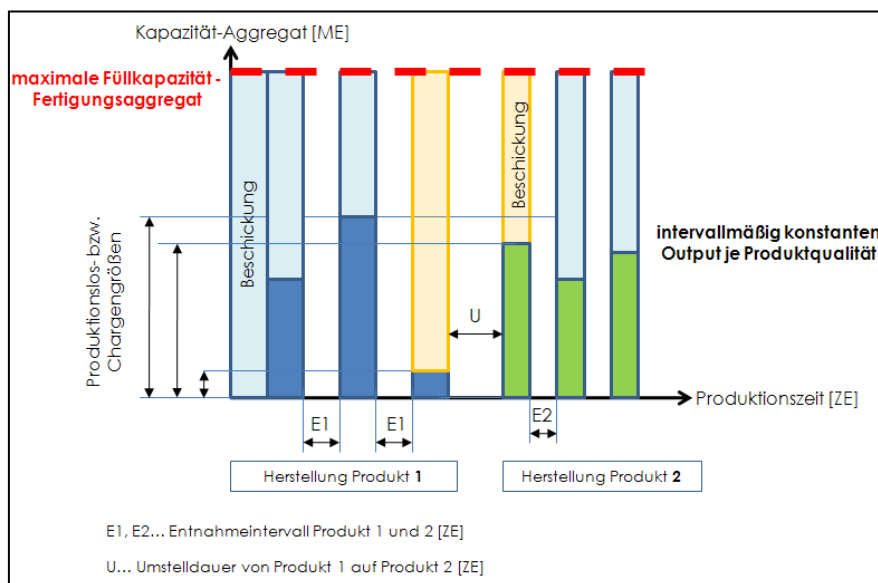


Abbildung 66: Bestimmung der Produktionslosgröße - Fall III<sup>623</sup>

Dabei wird je Abstich eine bestimmte Outputmenge (konstant oder variabel) aus dem Aggregat abgezogen. Die Outputmenge und somit die Größe des Produktionsloses bzw. der Charge wird dabei durch technologische Vorschriften bzw. der zugrundeliegenden Fertigungstechnologie bestimmt. Aus produktionslogistischer Sicht muss somit

<sup>622</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>623</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

(vorausgesetzt die darauf basierende Fertigungstechnologie bleibt unverändert) die Produktionslos- bzw. Chargengröße als fest angenommen werden. Variabel und somit steuerbar ist der Zeitpunkt bzw. die Intervalldauer der Entnahme je Produktqualität. Auch hier sei angemerkt, dass die Umstellung von einer Produktqualität auf eine andere fließend erfolgt.

Tatsache ist, dass bei hybriden Produktionssystemen alle oben angeführten Fälle eintreten können (siehe ausführlich dazu Abschnitt 4.2.5). In der Regel wird versucht die Produktionslosgröße so zu steuern bzw. festzulegen, dass der zur termintreuen Erfüllung der Produktionsaufträge notwendige Umstellaufwand so gering wie möglich gehalten wird.

#### *Produktionslose bei Stoffumformungsprozessen*

Die Wahl der Produktionslosgröße bei Prozessen der Stoffumformung kann im Wesentlichen auf Basis der im Nachfolgenden aufgelisteten Entscheidungsparameter erfolgen und variiert je nach den zugrundeliegenden Produktionszielen und -vorgaben.

Die Bestimmung bzw. Festlegung der Produktionslosgröße bzw. Charge kann unter dem Gesichtspunkt der Erreichung:

- minimaler Rüst-, Auftragswechsel- und Kapitalbindungskosten,
- maximaler Liefertreue,
- maximaler Auslastung,
- oder maximaler Lieferflexibilität

durchgeführt werden.

Generell gilt anzumerken, dass die diskontinuierliche Produktion:<sup>624</sup>

- deutlich flexibler bezgl. der Produktionslosgrößenwahl und Änderungen betreffend die Auftragsbearbeitungsreihenfolge im Vergleich zu Prozessen der Stoffumwandlung ist (d.h. bei Prozessen der Stoffumformung resultieren Änderungen im Produktionsprogramm meist in einem deutlich geringeren Anstieg der Kosten für Umstellungen, Rüstvorgänge etc.),
- die Lagerung von Halbfabrikaten zwischen zwei Prozessschritten leichter realisierbar ist, eine kontinuierliche Produktion hingegen unter normalen Bedingungen die Produkte (Fließressourcen) nicht speichert,
- den leichteren Herkunftsnachweis einzelner Lose ermöglicht,
- kaum bzw. tendenziell weniger Fehlmengen aufgrund von An- und Abfahrprozessen (bei Änderungen der zu produzierenden Erzeugnisse) aufweist,

---

<sup>624</sup> Vgl. Schönleben (2011), S. 385.

- und verhältnismäßig flexibler in Bezug auf die Anlagenbenützung bzw. das Ausweichen auf ein Ersatzaggregat ist.

Nachfolgend werden nun die Bewertungsparameter zur Bestimmung des Einflusses und der Auswirkungen der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die Logistikleistung erläutert.

#### 4.2.2 Bewertungsparameter zur Bestimmung des Losgrößen- und Reihenfolgeinflusses auf die Logistikleistung

Dieser Abschnitt beinhaltet die Vorstellung der Bewertungsparameter zur Bestimmung der Einflüsse und Auswirkungen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeward auf die in 4.1.1 ermittelten Zielgrößen der Logistikleistung – der Termintreue, der Durchlaufzeit und dem Produktmix.

*ZE* Zeiteinheit

*ME* Mengeneinheit

*GE* Geldeinheit

*n* Anzahl der zu produzierenden Aufträge in einer Zeitspanne *z* [ME]

##### a) Termintreue:

Die Wahl der Produktions- bzw. Chargengröße und Reihenfolge entscheidet mitunter darüber wie termintreu die Herstellung des Produktionsprogramms realisiert werden kann. Die Termintreue ist definiert als der Anteil an Aufträgen an der Summe aller in einem Betrachtungszeitraum produzierten Aufträge, welche termingerecht, d.h. ohne zeitliche Abweichungen (weder zu früh, noch zu spät) produziert wurden (siehe dazu Gleichung 64).<sup>625</sup>

$$T_{x,y} := \frac{\sum_{i=1}^n Att_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (\text{Gleichung 64})$$

wobei

*A<sub>tt</sub>* termingerecht produzierter Auftrag [-]

*A* zu produzierender Auftrag [-]

*T<sub>x,y</sub>* Termintreue bei Produktionslosgröße und Reihenfolge *x, y* [%]

Je nachdem wie termintreu die Produktion erfolgt, ergibt sich somit im Idealfall keine Abweichung vom festgelegten bzw. geplanten Soll-Termin zur Auftragsfertigstellung.

Die Produktionslosgröße (welche groß sein sollte) steht dabei in direktem Zielkonflikt zur Termintreue. Wie bereits angeführt, sollte um eine möglichst flexible und termintreue Produktion zu erhalten die Größe der Produktionslose so gering wie möglich sein. Kleine Lose führen aber zu

<sup>625</sup> Vgl. Nyhuis et al. (2003), S. 127 f.

einem Anstieg des Umstellaufwandes, welcher in höheren Rüst-, Einstell-, Umstell- und Justierzeiten resultiert und somit die Kosten für die Auftragserstellung steigen lässt.

Der mathematische Zusammenhang zwischen der Termintreue und der Produktionslosgröße und Reihenfolge wird in der nachfolgenden Gleichung 65 definiert.  $T_x$  und  $T_y$  stellen dabei, die bei einer gewählten Produktionslosgröße und Reihenfolge (in diesem Fall  $x$  und  $y$ ) erreichten Termintreue in % dar.

$$E_{xyT} := \frac{T_x}{T_y} \quad (\text{Gleichung 65})$$

wobei

$T_{x,y}$  Termintreue bei Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x, y$  [%]

$E_{xyT}$  Einflussfaktor auf die Termintreue von Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x$  auf  $y$  [-]

Um den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die Termintreue bestimmen zu können, wurde der dimensionslose Einflussfaktor  $E_{xyT}$ , wobei z.B.  $E_{xyT}$  die Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x$  zu  $y$  betrachtet und  $E_{yxT}$  die Produktionslosgröße und Reihenfolge  $y$  zu  $x$  fokussiert, im Bereich  $E_{xyT} > 0$  definiert. Durch diesen Faktor kann zum einen der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge der Auftragsabarbeitung auf die Termintreue ermittelt werden (wie stark die Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl die Termintreue beeinflusst) und zum anderen lässt sich damit die Frage beantworten, inwiefern die Termintreue durch die Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl (positiv oder negativ) beeinflusst wird (siehe dazu Abbildung 67). Dabei werden die erzielten Termintreuen  $T_x$  und  $T_y$ , welche mit unterschiedlichen Produktionslosgrößen und/oder Reihenfolgen erreicht werden können, gegenübergestellt. Ist  $E_{xyT} = 1$ , so kann davon ausgegangen werden, dass eine termintreue Produktion unabhängig von der Wahl der Produktionslosgröße und Reihenfolge ( $T_x = T_y$ ) möglich ist. Je mehr  $E_{xyT}$  vom Wert 1 abweicht, desto stärker wird die Termintreue durch die Produktionslosgröße und Reihenfolge beeinflusst, wobei gilt: Wenn  $E_{xyT}$  im Wertebereich  $0 < E_{xyT} < 1$  liegt, führt die gewählte Produktionslosgröße und Reihenfolge zu einer negativen Beeinflussung der Termintreue (je kleiner  $E_{xyT}$ , desto geringer ist die Termintreue) und umgekehrt bei Werten  $E_{xyT} > 1$ , führt die gewählte Produktionslosgröße und Reihenfolge zu einer Verbesserung der Termintreue. So lässt sich beispielsweise die Entscheidung mit der Produktionslosgröße und Reihenfolge  $y$  zu produzieren (was in einer schlechteren Termintreue  $T_y$  resultieren würde), als wenn die Produktion mit der Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x$  erfolgen würde, durch den Einflussfaktor  $E_{yxT}$  darstellen, da dieser einen Wert für  $E_{yxT} < 1$  annehmen würde. Hingegen würde die Produktion mit der Losgröße und Reihenfolge  $x$  (vorausgesetzt es gilt, dass die Termintreue  $T_x$  höher ist als die Termintreue  $T_y$ ) zu einer besseren Termintreue führen, was in einem Einflussfaktor  $E_{xyT} > 1$  resultiert.

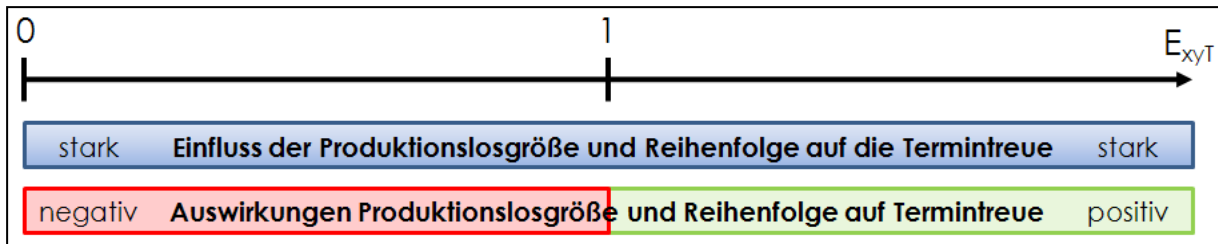


Abbildung 67: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf die Termintreue<sup>626</sup>

**b) Durchlaufzeit:**

Zur Bestimmung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die Durchlaufzeit wird die aus der Herstellung der Aufträge resultierende Gesamtdurchlaufzeit (= Zeitspanne von Beginn des ersten Bearbeitungsschrittes des ersten Auftrages bis zum Ende des letzten Bearbeitungsschrittes des letzten Auftrages) in Zeiteinheiten (ZE) je nach festgelegter Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x$  und  $y$  in einer definierten Messstrecke  $m$  herangezogen (siehe dazu Gleichung 66).

$$DLZ_{x,y} := \sum_{i=1}^n t_{Bi} + t_{Wi} + t_{Ri} + t_{Li} + t_{Ti} + t_{Zi} \quad (\text{Gleichung 66})$$

wobei

$t_{Bi}$  Bearbeitungszeit je Auftrag [ZE]

$t_{Wi}$  Wartezeit je Auftrag [ZE]

$t_{Ri}$  Rüstzeit je Auftrag [ZE]

$t_{Li}$  Liegezeit je Auftrag [ZE]

$t_{Ti}$  Transportzeit je Auftrag [ZE]

$t_{Zi}$  Zusatzzeit je Auftrag [ZE]

$DLZ_{x,y}$  Durchlaufzeit bei Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x,y$  in Messstrecke  $m$  [ZE]

Je größer die Durchlaufzeit  $DLZ_{x,y}$  ist, desto ungeeigneter wurde die Wahl der Produktionslosgröße bzw. der Auftragsreihenfolge gewählt und desto negativer wirkt sich diese auf die Durchlaufzeit aus.

Um nun den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge abbilden zu können, werden die ermittelten Durchlaufzeiten, beispielsweise  $DLZ_x$  für die Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x$  und  $DLZ_y$  für Produktionslosgröße und Reihenfolge  $y$  zueinander in Beziehung gestellt (siehe Gleichung 67).

$$E_{xyD} := \frac{DLZ_x}{DLZ_y} \quad (\text{Gleichung 67})$$

<sup>626</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

wobei

$E_{xyD}$  Einflussfaktor auf die Durchlaufzeit von Produktionslosgröße und Reihenfolge x auf y [-]

Je nachdem welchen dimensionslosen Wert  $E_{xyD}$  annimmt, kann analog zum Wert  $E_{xyT}$  für die Termintreue, die Aussage darüber getroffen werden, wie stark die Durchlaufzeit durch die Produktionslosgröße bzw. Auftragsreihenfolge (im Vergleich zu einer zweiten Produktionslosgröße und Reihenfolge) „bestimmt“ wird und inwiefern (positiv oder negativ) eine gewählte Produktionslosgröße bzw. Auftragsreihenfolge die Durchlaufzeit beeinflusst (siehe dazu Abbildung 68). Dabei gilt, je größer der Wert  $E_{xyD}$  ist, desto stärker ist der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die Durchlaufzeit. Ebenso kann dadurch die Aussage getroffen werden, dass ein Wert von  $E_{xyD} > 1$  zu einer Erhöhung der Durchlaufzeit führt und somit negative Auswirkungen auf diese hat.

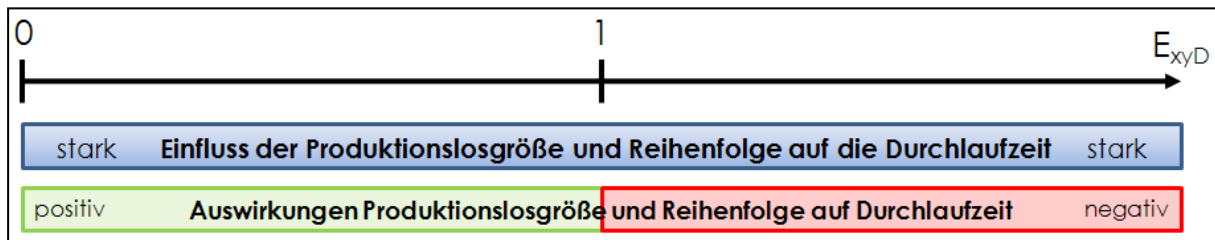


Abbildung 68: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf die Durchlaufzeit<sup>627</sup>

### c) Produktmix:

Zur Bestimmung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf den Produktmix wird der dimensionslose Variantenerzeugungskoeffizient  $V_x$  im Bereich ( $V_x > 0$ ) je Aggregat definiert (siehe Gleichung 68). Dieser gibt Auskunft darüber, welche Produktionsmenge an unterschiedlichen Qualitäten bzw. wie viele Komponenten oder Teile verschiedener Aufträge mit einem Produktionslos  $x$  ohne Umrüsten auf einem Aggregat erzeugt werden können.

$$V_x := \frac{p_x}{k_x} \quad (\text{Gleichung 68})$$

wobei

$p_x$  Produktionslos je Aggregat x [ME]

$k_x$  Produktionsmenge bzw. Anzahl herzustellender Erzeugnisse je Aggregat ohne Umrüsten [ME]

$V_x$  Variantenerzeugungskoeffizient je Aggregat x [-]

Je mehr unterschiedliche Varianten durch ein Produktionslos auf einem Aggregat ohne Umrüsten erzeugt werden können, d.h. je größer  $V_x$  ist, desto besser eignet sich die gewählte Produktionslosgröße und Reihenfolge aufgrund einer geringeren Anzahl an Umstellungen zur wirtschaftlichen Realisierung des geforderten Produktmixes (siehe dazu Abbildung 69). Dies

<sup>627</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

impliziert, dass bei  $V_x = 1$  die Erzeugung der gesamten Auftragsmenge durch ein Produktionslos auf einem Aggregat möglich ist. Somit kann durch die Bestimmung des Variantenerzeugungskoeffizienten  $V_x$  je Aggregat die Identifizierung des Engpassaggregates (bezogen auf den Produktmix), bei welchem  $V_x$  den geringsten Wert annimmt, vorgenommen werden. Gleichzeitig lässt sich damit auch jenes Aggregat bestimmen, welches zu den höchsten Herstellungskosten je Variante aufgrund der höheren Anzahl an notwendigen Umstellungen führt bzw. müssen dabei die fixen Kosten auf eine geringere Produktionsmenge verteilt werden, was eine ausbleibende Fixkostendegression und somit einen Anstieg der Herstellkosten je Variante ( $V_x < 1$ ) impliziert.



**Abbildung 69: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss zur Erstellung des Produktmix je Aggregat<sup>628</sup>**

Zusammengefasst ergibt sich die Bestimmung bzw. Beurteilung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge sowie deren Auswirkungen auf die Logistikleistung durch die Ermittlung der drei Faktoren –  $E_{xyT}$  für die Termintreue,  $E_{xyD}$  für die Durchlaufzeit und  $V_x$  für den Produktmix.

### 4.2.3 Bewertungsparameter zur Bestimmung des Losgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf die Logistikkosten

Analog zum vorigen Abschnitt werden nun die Bewertungsparameter zur Bestimmung des Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinflusses und dessen Auswirkungen auf die Zielgrößen der Logistikkosten erläutert.

#### a) Auslastung:

Um den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die Auslastung bestimmen zu können, erfolgt die Betrachtung der Leerkosten, welche aufgrund ungenützter Kapazitäten oder durch bedingte Stillstände wie beispielsweise bei Auftragswechsel in einem Produktionssystem entstehen können. Dabei werden die je nach Wahl der Produktionslosgröße und Auftragsreihenfolge entstehenden Leerkosten zueinander in Beziehung gestellt (siehe dazu Gleichungen 69 und 70). Analog würde dasselbe Ergebnis durch das Verhältnis der entstehenden Summen aus den Warte-, Rüst-, Einstell- und Justierzeiten erzielt werden können.

$$K_{Lx,y} := \sum_{i=1}^n K_{Li} \quad (\text{Gleichung 69})$$

<sup>628</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.



$$E_{xyA} := \frac{K_{Lx}}{K_{Ly}} \quad (\text{Gleichung 70})$$

wobei

$K_{Li}$  Leerkosten je Aggregat [GE]

$K_{Lx,y}$  Leerkosten aller Aggregate in einem Arbeitssystem bei Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x, y$  [GE]

$E_{xyA}$  Einflussfaktor auf die Auslastung von Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x$  auf  $y$  [-]

Je größer die Summe der Leerkosten bei einer gewählten Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x$  ist (d.h. je größer auch der dimensionslose Faktor  $E_{xyA}$  ist), desto mehr beeinflusst die Produktionslosgröße und Auftragsreihenfolge die Auslastung eines Produktionssystems. Ebenso kann durch den Faktor  $E_{xyA}$  die Aussage darüber getroffen werden, ob sich das ermittelte Produktionslos und die Auftragsreihenfolge  $x$  positiv oder negativ im Vergleich zur Produktionslosgröße und Reihenfolge  $y$  auf die Auslastung des Systems auswirkt (siehe dazu Abbildung 70).

Werden beispielsweise die Leerkosten zweier Lose  $x$  und  $y$  gegenübergestellt, so ergibt sich im Falle  $E_{xyA} < 1$  eine positive Beeinflussung durch  $x$ , hingegen bei einem Faktor von  $E_{xyA} > 1$  würde man auf eine negative Beeinflussung von  $x$  auf die Auslastung schließen und daher die Alternative  $y$  bevorzugen.

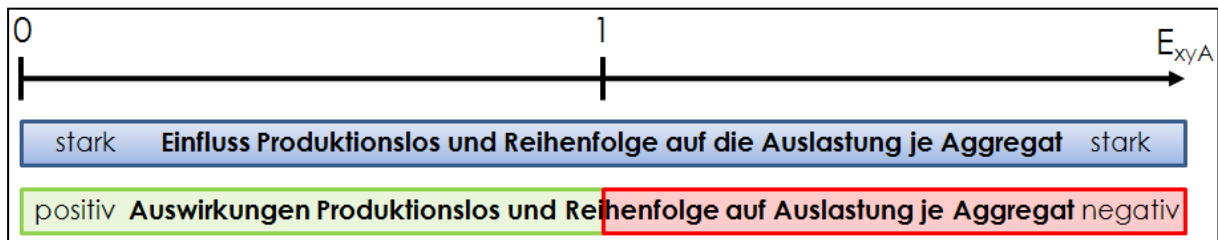


Abbildung 70: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf die Auslastung je Aggregat<sup>629</sup>

#### b) Bestand:

Bei steigender Losgröße bzw. sinkender Losauflagehäufigkeit müssen die produzierten Mengen bis zu ihrer Bedarfsperiode gelagert werden, wodurch der Bestand im Arbeitssystem und somit auch die Lagerhaltungskosten und die Kapitalbindung steigen (ausgedrückt im Kostenfaktor  $K_{x,yB}$  in Geldeinheiten (GE) in Gleichung 71).<sup>630</sup>

$$K_{x,yB} := \sum_{i=1}^s K_{LHi} + K_{Bi} \quad (\text{Gleichung 71})$$

wobei

<sup>629</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>630</sup> Vgl. Wirtschaftslexikon Gabler (2011).

- $K_{LHi}$  Lagerhaltungskosten je Auftrag [GE]
- $K_{Bi}$  Kapitalbindung je Auftrag [GE]
- $K_{x,yB}$  Lagerkosten bei Produktionslosgröße und Reihenfolge x,y [GE]
- $s$  Anzahl der Fertigungsstufen [-]

Um den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf den Bestand sichtbar zu machen, werden die je nach Losgröße und Reihenfolge entstehenden Lagerhaltungskosten (für die Halbfabrikate) sowie die aus den Halbfabrikatbeständen resultierende Kapitalbindung in allen Produktionsstufen betrachtet und durch den dimensionslosen Faktor  $E_{xyB}$  ausgedrückt (siehe Gleichung 72).

$$E_{xyB} := \frac{K_{xB}}{K_{yB}} \quad (\text{Gleichung 72})$$

wobei

$E_{xyB}$  Einflussfaktor auf den Bestand von Produktionslosgröße und Reihenfolge x auf y [-]

Analog zu den Einflussfaktoren der anderen Zielgrößen kann durch den Faktor  $E_{xyB}$  der Einfluss einer Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x$  im Vergleich zu  $y$  auf den Fertigungsbestand und den dadurch entstehenden Kosten abgebildet werden und somit eine Aussage darüber getroffen werden, ob die gewählte Produktionslosgröße und Reihenfolge zu einer positiven ( $E_{xyB} < 1$ ) oder negativen Beeinflussung ( $E_{xyB} > 1$ ) der Bestände führt (siehe Abbildung 71).

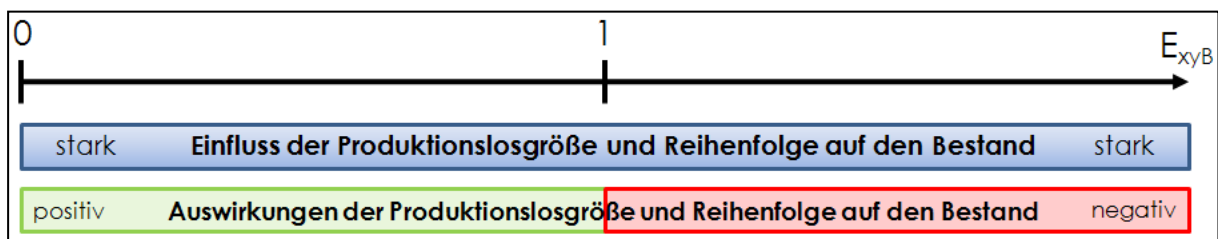


Abbildung 71: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf den Bestand<sup>631</sup>

### c) Umstellaufwand:

Der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf den Umstellaufwand wird durch die je nach Produktionslosgröße und Auftragsreihenfolge entstehenden Auftragswechselkosten  $K_{xU}$ , welche sowohl die anfallenden Kosten für Umstellungen, Rüstvorgänge, Einstell- und Justiervorgänge enthalten, definiert (siehe dazu Gleichung 73).

$$K_{x,yU} := \sum_{i=1}^n K_{Ai} \quad (\text{Gleichung 73})$$

wobei

<sup>631</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

$K_{Ai}$  Umstelllaufwand je Auftragswechsel [GE]

Die je nach Wahl der Produktionslosgröße und Bearbeitungsfolge der Aufträge resultierenden Auftragswechselkosten werden im dimensionslosen Faktor  $E_{xyU}$  wieder zueinander in Beziehung gestellt (siehe Gleichung 74) um analog zu den anderen Zielgrößen den Einfluss und die Auswirkungen der Produktionslosgröße und Reihenfolge bestimmen zu können (siehe Abbildung 72). So gilt, dass ein Faktor  $E_{xyU} > 1$  (der Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x$  im Vergleich zur Alternative  $y$ ) in einem höheren Umstelllaufwand und somit in steigenden Auftragswechselkosten resultiert, ein Faktor von  $E_{xyU} < 1$  hingegen bedeutet, weniger Umstellungen und somit auch geringere Auftragswechselkosten.

$$E_{xyU} := \frac{K_{xU}}{K_{yU}} \quad (\text{Gleichung 74})$$

wobei

$E_{xyU}$  Einflussfaktor auf den Umstelllaufwand von Produktionslosgröße und Reihenfolge  $x$  auf  $y$  [-]

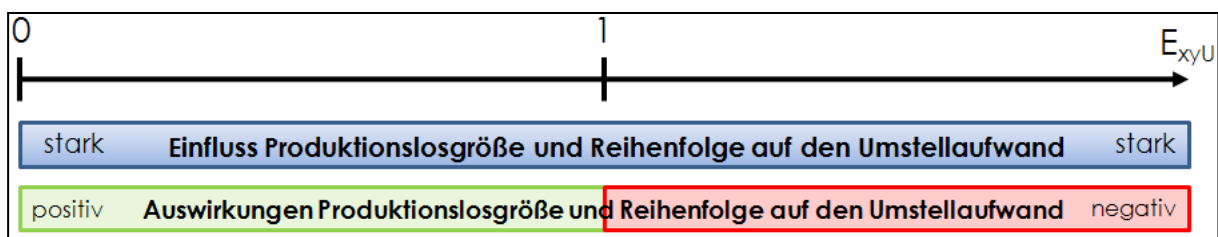


Abbildung 72: Bewertungsskala Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf Umstelllaufwand<sup>632</sup>

#### d) Anlagenverfügbarkeit:

Die Anlagenverfügbarkeit steht unter keinem direkten Einfluss der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl und wird daher an dieser Stelle nicht weiter beleuchtet. Die Verfügbarkeit einer Anlage wird vor allem durch die im Anlagenmanagement geregelte Anlageninstandhaltung, unter welcher man die Bewahrung und Wiederherstellung des angestrebten Sollzustandes der technischen Betriebsmittel (insbesondere der Informationsgewinnung und -verarbeitung für bewahrende und wiederherstellende Maßnahmen und Bereitschaftsleistungen) versteht, bestimmt.<sup>633</sup> Obwohl zwar die Abnutzung eines Aggregates empirisch ermittelt werden kann, lässt sich äußerst schwierig eine qualitative und/oder quantitative Aussage darüber treffen, inwieweit die gewählte Produktionslosgröße und Reihenfolge darauf Einfluss nimmt.

Zusammengefasst kann der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die Zielgrößen der Logistikkosten durch die Faktoren  $E_{xyA}$  für die Auslastung,  $E_{xyB}$  für den Bestand und dem Faktor  $E_{xyU}$  für den Aufwand an Umstellungen bewertet werden.

<sup>632</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>633</sup> Vgl. Biedermann (2008), S. 42.

#### 4.2.4 Ableitung des Bewertungsinstrumentariums

Um den Einfluss der Produktionslosgröße und Auftragsreihenfolge auf die Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem bestimmen zu können, wurden die in 4.2.2 und 4.2.3 genannten Einflussfaktoren für die Logistikleistung und Logistikkosten in einem (in der nachfolgenden Abbildung 73 dargestellten) relativen Bewertungsinstrumentarium zusammengefasst.

Das hier vorgestellte Bewertungsinstrumentarium kann in der betrieblichen Praxis als Werkzeug herangezogen werden, um so die Fragen

- a) welchen Einfluss die betrachteten Losgrößen- und Reihenfolgealternativen auf die einzelnen logistischen Zielgrößen ausüben und wie sich diese auf das Leistungsverhalten eines Produktionssystems (beschrieben durch den Kennlinienverlauf der Zielgrößen) auswirken,

und

- b) wie die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung zu erfolgen hat, um eine bessere Abstimmung dieser hinsichtlich einer spezifischen Zielgröße oder eine Verbesserung hinsichtlich mehrerer betrachteter Zielgrößen zu erhalten (siehe Abstimmungsprozess Abschnitt 4.4.1),

beantworten zu können.

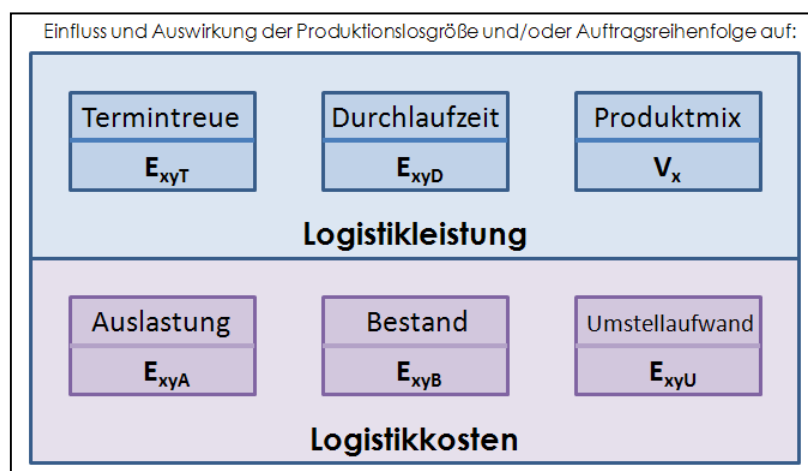


Abbildung 73: Bewertungsinstrumentarium<sup>634</sup>

Die Fragestellung a) kann durch den paarweisen Vergleich aller aus den Losgrößen- und Reihenfolgealternativen resultierenden Zielgrößen (beispielsweise für Losgröße und Reihenfolge A, B und C) beantwortet werden. Als Ergebnis erhält man dabei die aus jeder Losgrößen- und Reihenfolgealternative resultierenden Zielgrößen, welche paarweise gegenübergestellt werden (beispielsweise der Einflussfaktor  $E_{ABT}$  resultiert aus dem Verhältnis der Termintreue bei Los und Reihenfolge A zur Termintreue bei Los und Reihenfolge B).

<sup>634</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Für drei Alternativen A, B und C ergeben sich somit insgesamt 36 verschiedene Einflussfaktoren: 18 Faktoren für die Bewertung des Losgrößen- und Reihenfolgeinflusses auf die Logistikleistung und 18 Faktoren für die Logistikkosten, wobei man pro Los und Reihenfolge 6 Faktoren für den Einfluss auf die Logistikleistung und 6 Faktoren für die Logistikkosten, also 12 Faktoren je Losgrößen- und Reihenfolgealternative erhält (siehe dazu Abbildung 74).

In der nachfolgenden Abbildung ist die beispielhafte Anwendung des Bewertungsinstrumentariums auf die Zielgröße der Termintreue erläutert, wobei dies analog für alle anderen Zielgrößen zu sehen ist. Durch den Vergleich der einzelnen Losgrößen- und Reihenfolgealternativen miteinander (A mit B und C, B mit A und C und C mit A und B) erhält man sechs verschiedene Einflussfaktoren der Termintreue (zwei für jede Los- und Reihenfolgealternative; in Abbildung 74 rot markiert). Anhand dieser Faktoren kann ermittelt werden, welche Losgrößen- und Reihenfolgealternative zur besten Termintreue führt (dort wo  $E_{xyT}$  den größten Wert annimmt).

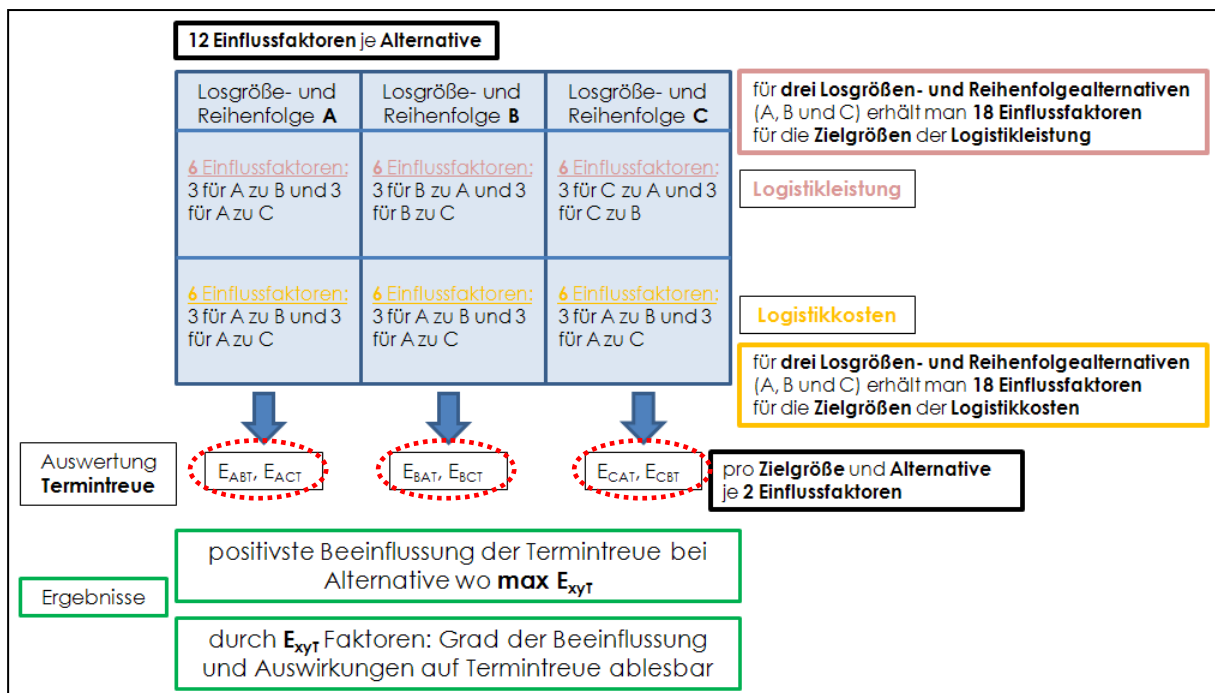


Abbildung 74: Anwendung Bewertungsinstrumentarium auf Zielgröße Termintreue<sup>635</sup>

Weiters kann der Grad des Einflusses der Produktionslosgrößen- und Auftragsreihenfolgealternative auf die Termintreue abgebildet und bewertet werden (siehe dazu Bewertungsskala in Abbildung 67). Durch die Anwendung des entwickelten Instrumentariums kann also, wie bereits erwähnt, eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Beeinflussung der Produktionslosgrößen- und Auftragsreihenfolgealternative auf die Termintreue in einer positiven ( $E_{xyT} > 1$ ) oder negativen ( $E_{xyT} < 1$ ) Richtung erfolgt bzw. Auswirkung resultiert.

<sup>635</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Nachfolgend wird nun exemplarisch die Anwendung des Bewertungsinstrumentariums für die Bestimmung des Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeinflusses auf die Termintreue berechnet:

Man bestimme zunächst die bei Anwendung der unterschiedlichen Losgrößen- und Reihenfolgealternativen A, B und C resultierenden Termintreuen  $T_A$ ,  $T_B$  und  $T_C$  z.B. mittels Simulation (siehe dazu Tabelle 14).

**Tabelle 14: exemplarische Berechnung des Einflusses unterschiedlicher Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternativen auf die Termintreue<sup>636</sup>**

|   | <b>erreichte Termintreue<br/>je Alternative</b> |   |
|---|---|---|
| Produktionslosgröße- und Reihenfolge <b>A</b>                               | 90%   |   |
| Produktionslosgröße- und Reihenfolge <b>B</b>                               | 84%   |   |
| Produktionslosgröße- und Reihenfolge <b>C</b>                               | 80%   |   |
| <b>Berechnung der Einflussfaktoren <math>E_{xyT}</math> je Alternative:</b> |   |   |
| $E_{ABT}$   | 1,07  | für Produktionslosgröße- und Reihenfolge <b>A</b> |
| $E_{ACT}$   | 1,13  |   |
|   |   |   |
| $E_{BAT}$   | 0,93  | für Produktionslosgröße- und Reihenfolge <b>B</b> |
| $E_{BCT}$   | 1,05  |   |
|   |   |   |
| $E_{CAT}$   | 0,89  | für Produktionslosgröße- und Reihenfolge <b>C</b> |
| $E_{CBT}$   | 0,95  |   |

Aus der Berechnung der einzelnen Einflussfaktoren  $E_{ABT}$  und  $E_{ACT}$  für die Alternative A,  $E_{BAT}$  und  $E_{BCT}$  für die Alternative B und  $E_{CAT}$  und  $E_{CBT}$  für die Alternative C können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Die beste Termintreue resultiert aus der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative A (da hier  $E_{ACT} = 1,13$ ).
2. Je weiter die berechneten Faktoren vom Wert 1 abweichen, desto größer ist der Einfluss der Produktionslosgröße- und Reihenfolge auf die Zielgröße. Im Fallbeispiel ist der größte Einfluss bei  $E_{ACT}$  gegeben, weiter bei  $E_{CAT}$  usw.
3. Je nachdem, ob die Faktoren einen Wert  $>$  oder  $<$  1 annehmen, kann auf die Auswirkungen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternativen auf die Termintreue geschlossen werden. Eine positive Auswirkung auf die Termintreue kann bei der Wahl der Alternative A gegenüber B und C sowie bei der Wahl der Alternative B gegenüber

<sup>636</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

C erreicht werden. Alle anderen Alternativen resultieren in einer negativen Beeinflussung, da die  $E_{xyT}$ -Faktoren einen Wert  $< 1$  annehmen.

Weiters ist die Übertragung dieser Erkenntnisse in die Kennlinientheorie möglich, da durch die multiplikative Erweiterung der bestehenden Ansätze der Kennlinientheorie um die aus dem Bewertungsinstrumentarium erhaltenen Einflussfaktoren je Losgröße und Reihenfolge, der Einfluss einer Produktionslosgröße und Reihenfolge durch den veränderten Kennlinienverlauf dargestellt und somit sichtbar gemacht werden kann. Somit lassen sich der Einfluss und die Auswirkungen einer Losgrößen- und Reihenfolgealternative auf die Logistikleistung und die Logistikkosten eines Produktionssystems abbilden.

Die Beantwortung der oben angeführten Fragestellung b) erfolgt durch die Anwendung des in Abschnitt 4.4 entwickelten Vorgehenskonzepts, weshalb an dieser Stelle auf Abschnitt 4.4.1 verwiesen wird.

#### **4.2.5 Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss in hybriden Produktionssystemen**

Nachfolgend wird nun das im vorigen Kapitel entwickelte Bewertungsinstrumentarium auf ein hybrides Produktionssystem angewandt. Wie bereits aus Abschnitt 4.2.1 hervorgeht, kann die Produktionslosgröße in der hybriden Fertigung unterschiedliche Ausprägungen annehmen, wonach der Einfluss der Produktionslosgröße auf die logistischen Zielgrößen variieren kann.

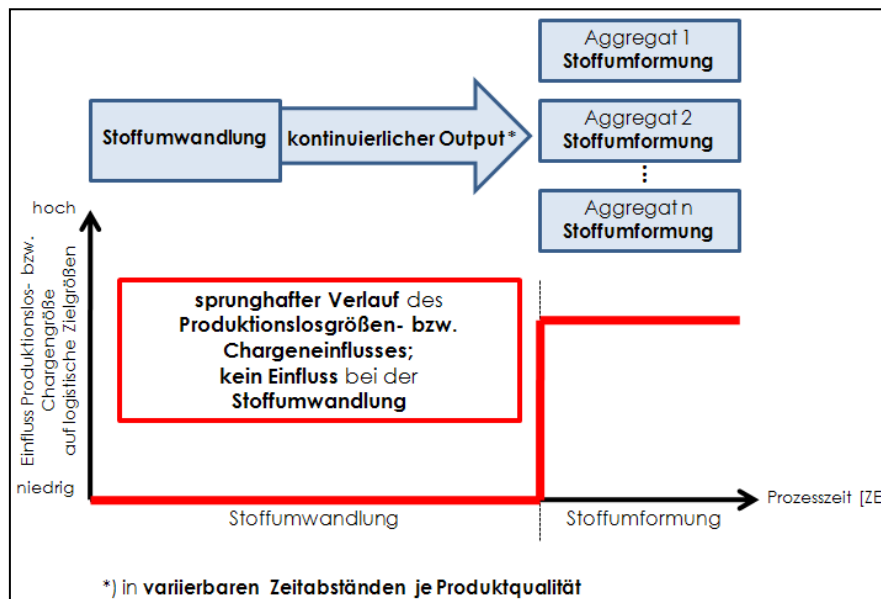
Hybride Produktionssysteme sind durch den Übergang von der Stoffumwandlung zur Stoffumformung gekennzeichnet, wonach eine beliebige Mischform aus den in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Fällen auftreten kann. Im Nachfolgenden werden die in der betrieblichen Praxis am häufigsten auftretenden Ausprägungen, welche ein hybrides Produktionssystem hinsichtlich der Bestimmung der Produktionslosgröße annehmen kann, diskutiert und der dabei herrschende Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen erläutert.

##### **Situation 1: Stoffumwandlung (Fall I) und Stoffumformung**

Zum einen kann die Situation eintreten, dass die Produktionslos- oder Chargengröße je Produktqualität des Stoffumwandlungsprozesses inputseitig über die maximale Füllkapazität des Fertigungsaggregats bestimmt wird (Fall I). Dabei erfolgt die Stoffumwandlung mit einem mengenmäßig konstanten Output je Produktqualität, welcher kontinuierlich an die anschließenden Aggregate der Stoffumformung zur Weiterverarbeitung weitergereicht wird.

Wie schematisch in Abbildung 75 dargestellt, nimmt in der ersten Situation der Einfluss der Produktionslos- bzw. Chargengröße auf die Zielgrößen einen sprunghaften Verlauf an. Da die Chargengröße bei der Stoffumwandlung durch die maximale Füllkapazität bestimmt wird,

kann diese aufgrund ihrer fixen Vorgabe keinen Einfluss bzw. Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen nehmen.



**Abbildung 75: Einfluss Produktionslos- bzw. Chargengröße auf Prozesse - Situation 1<sup>637</sup>**

Hingegen steigt der Einfluss dieser bei der Stoffumformung (ausgedrückt durch die in 4.2.2 und 4.2.3 entwickelten Bewertungsparameter) von 0 beginnend (da bei der Stoffumwandlung kein Einfluss auftritt) sprunghaft an. Der kontinuierliche Output der Stoffumwandlung, welcher auf den nachfolgenden Aggregaten im Zuge einer Stoffumformung weiterverarbeitet wird, bestimmt bzw. beeinflusst die logistischen Zielgrößen der Stoffumformungsprozesse maßgeblich. Dabei übt die Herstellungsreihenfolge der Produktqualitäten im Zuge der Stoffumwandlung (d.h. wie die Beschickung des Stoffumwandlungsaggregats erfolgt) den eigentlichen Einfluss auf die logistischen Zielgrößen der Stoffumformung aus. So führt eine geeignete Wahl der Herstellungsreihenfolge unterschiedlicher Qualitäten bei der Stoffumwandlung zu einer gleichmäßigen Chargenbildung bzw. Maschinenbelegung (Auslastung) der anschließenden Stoffumformungsaggregate bzw. kann dadurch eine Reduzierung des Umschlaufaufwands erreicht werden, weshalb die Produktionsplanung hybrider Produktionsprozesse stets unter Berücksichtigung der Interdependenzen zwischen den Stoffumwandlungs- und Stoffumformungsprozessen zu geschehen hat. In der betrieblichen Praxis bedient man sich auch der Möglichkeit, dass der Einfluss der Stoffumwandlung auf die Stoffumformungsprozesse bzw. negative Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen dieser, durch das Einschalten eines oder mehrerer Pufferaggregate (z.B. Warmhalteöfen) ausgeglichen werden können.

**Situation 2: Stoffumwandlung (Fall II) und Stoffumformung**

<sup>637</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.



Weiters kann die Situation eintreten, dass die Produktionslos- bzw. Chargengröße bei der Stoffumwandlung durch den kontinuierlichen, mengenmäßig variierbaren Output je Produktqualität (Fall II) gekennzeichnet ist. Bei der Stoffumwandlung werden somit unterschiedliche Produktionslos- bzw. Chargengrößen (Kampagnen) erzeugt, welche kontinuierlich an die nachfolgenden Aggregaten der Stoffumformung zur Weiterverarbeitung gelangen.

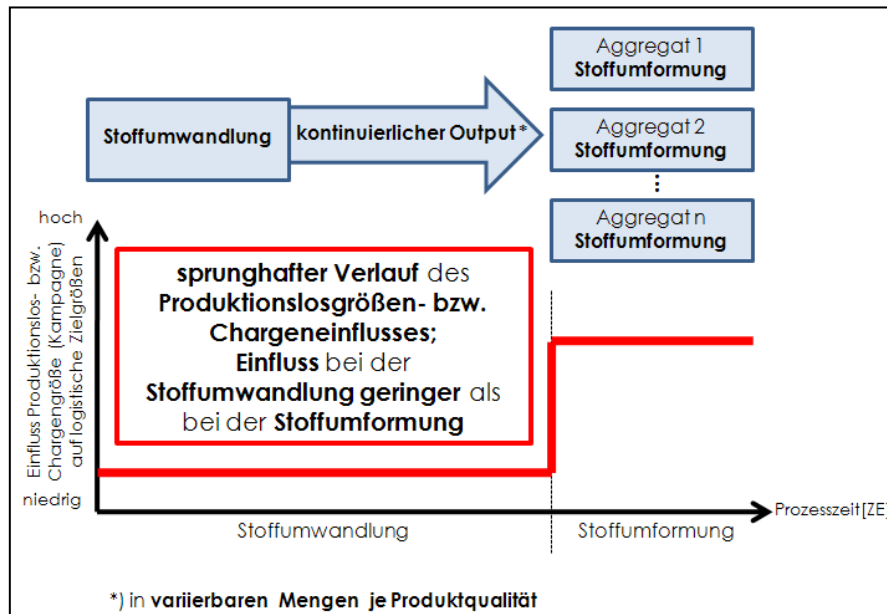


Abbildung 76: Einfluss Produktionslos- bzw. Chargengröße auf Prozesse - Situation 2<sup>638</sup>

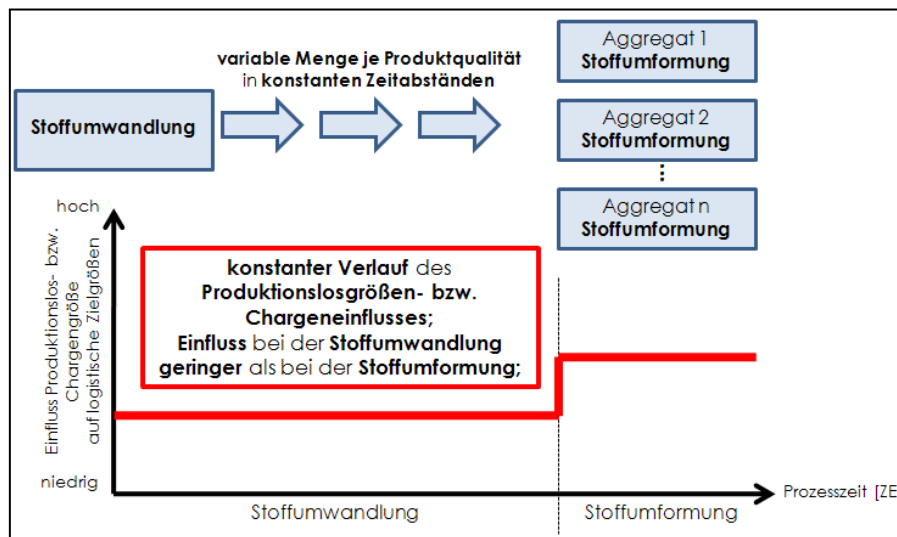
Für die in Abbildung 76 dargestellte Situation ergibt sich ebenso ein sprunghafter Verlauf des Losgrößen- bzw. Chargeneinflusses auf die logistischen Zielgrößen. Dieser unterscheidet sich zur ersten Situation dahingehend, dass die Produktionslos- bzw. Chargengrößenwahl (Kampagnengröße) bereits Auswirkungen auf die logistische Zielgrößen bei der Stoffumwandlung hat, welche jedoch geringer im Vergleich zur Stoffumformung ausfallen werden. Dies impliziert, dass der Einfluss der Produktionslos- bzw. Chargengröße auf die Zielgrößen der Stoffumwandlung generell  $\leq$  dem Einfluss der Produktionslos- bzw. Chargengröße auf die Zielgrößen der Stoffumformung ist. Dies liegt darin begründet, dass zur mengenmäßigen Festlegung der Kampagne im Zuge der Stoffumwandlung meist, jedoch nicht zwingend, die maximale Füllkapazität des Aggregates herangezogen wird. Die Veränderbarkeit der Produktionslose bzw. Chargen im Hinblick auf die Abarbeitung auf den Aggregaten der Stoffumformung ist aufgrund der mengenmäßigen Festlegung der Kampagne im Zuge der Stoffumwandlung eingeschränkt und negative Auswirkungen bzw. Einflüsse der Produktionslos- bzw. Chargengröße auf die logistischen Zielgrößen der Stoffumformung sind somit schwieriger auszugleichen. Tatsache ist, dass die nachfolgende Chargenplanung im Zuge der Stoffumformung durch die mengenmäßige Festlegung der Kampagnengröße wesentlich bestimmt wird. Daher muss gerade in dieser Situation den Interdependenzen zwischen der Stoffumwandlung und -

<sup>638</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

umformung bei der Festlegung der Kampagnengröße vermehrt Beachtung geschenkt werden, um eine über alle Fertigungsstufen effiziente Produktion realisieren zu können.

**Situation 3:** Stoffumwandlung (**Fall III**) und Stoffumformung

Ebenso kann der Fall eintreten, dass ein auf Basis der Fertigungstechnologie mengenmäßig bestimmter Output je Produktqualität der Stoffumwandlung (Fall III) in einem variierbaren Zeitintervall zur Weiterverarbeitung an die Stoffumformung gereicht wird.



**Abbildung 77: Einfluss Produktionslos- bzw. Chargengröße auf Prozesse - Situation 3<sup>639</sup>**

Wie in Abbildung 77 dargestellt, kann in dieser Situation davon ausgegangen werden, dass ein konstanter Einfluss (und aufgrund der unterschiedlichen Outputmengen auch ein größerer Einfluss als in Situation 2) der Produktionslos- bzw. Chargengröße auf die logistischen Zielgrößen bei der Stoffumwandlung herrscht, jedoch dieser aufgrund der Tatsache, dass die Festlegung des mengenmäßigen Outputs auf verfahrenstechnischen Restriktionen beruht, aus produktionslogistischer Sicht nicht bzw. kaum steuerbar ist. Daher ist auch die Veränderbarkeit der Produktionslos- bzw. Chargengröße im Hinblick auf die Stoffumformung durch die verfahrensbedingte Festlegung des mengenmäßigen Outputs der Stoffumwandlungsaggregate eingeschränkt. Jedoch kann bereits bei der Stoffumwandlung durch die variierbaren Zeitabstände der Outputweitergabe dieser, eine positive Abstimmung auf die logistischen Zielgrößen der Stoffumformungsprozesse ausgeübt werden. Somit hat auch hierbei die Bestimmung bzw. Festlegung der Zeitintervalle der Outputs der Stoffumwandlung unter Berücksichtigung der anschließenden Stoffumformung zu geschehen bzw. müssen etwaige negative Auswirkungen oder Einflüsse durch das Zwischenschalten von Pufferaggregaten ausgeglichen werden.

In den nachfolgenden Abschnitten 4.3, 4.4 und 4.5 wird der Begriff Produktionslos und Charge synonym verwendet.

<sup>639</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

## 4.3 Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf logistische Kennlinien

In diesem Abschnitt werden die Einflüsse und Auswirkungen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl auf die logistischen Kennlinien (und den darin abgebildeten Zielgrößen) sowie die daraus resultierenden Veränderungen der Kennlinienverläufe erläutert. Zunächst erfolgt in Abschnitt 4.3.1 die allgemeine Darstellung des Losgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf logistische Kennlinien, um darauf aufbauend, diese für ein hybrides Produktionssystem (Abschnitt 4.3.2) abzuleiten.

### 4.3.1 Darstellung des Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf logistische Kennlinienverläufe

In Abschnitt 4.2 wurde ein Bewertungsinstrumentarium entwickelt anhand dessen der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge ermittelt werden kann. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse, welche mathematisch anhand der definierten Einflussfaktoren beschrieben werden können, werden nun auch verwendet, um den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf den Kennlinienverlauf logistischer Zielgrößen übertragen zu können. Dazu werden die bestehenden Ansätze der Kennlinientheorie um die in 4.2.2 und 4.2.3 ermittelten Einflussfaktoren erweitert:

#### 1. Termintreue:

Die Kennlinie der Termintreue basiert auf der Kennlinie der Durchlaufzeit und ist als die Abweichung der Plan- zur Ist-Durchlaufzeit definiert. Es wird davon ausgegangen, dass eine gewisse Toleranzbreite existiert, innerhalb derer eine Lieferung noch als pünktlich gilt. Würde die Durchlaufzeit keine Streuung aufweisen, wären alle Aufträge innerhalb dieses Fensters termintreu. Da die Durchlaufzeit in der Realität in einem gewissen Ausmaß streut, muss eine Verteilung der Durchlaufzeiten angenommen werden. Untersuchungen haben ergeben, dass sich die Annahme einer Normalverteilung für die Darstellung der Kennlinie der Termintreue als ausreichend korrekt erweist.<sup>640</sup> Somit lässt sich der Verlauf der Termintreue in Abhängigkeit der Durchlaufzeit wie folgt definieren (siehe Gleichung 75):

$$T(DLZ) := \frac{1}{\sqrt{2 * \pi * \sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(DLZ - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \text{ für } DLZ \in \mathbb{R}^+ \setminus 0 \quad (\text{Gleichung 75})$$

wobei

$T$  Termintreue [%]

$DLZ$  Durchlaufzeit eines Auftrages; Zufallsvariable [ZE]

<sup>640</sup> Vgl. Yu (2009), S. 115 ff. und Arnold et al. (2008), S. 240 f.

$\mu$  Erwartungswert<sup>641</sup> der Durchlaufzeit  $E(DLZ)$  [-]

$$E(DLZ) := \sum_{i=1}^m p_i \cdot DLZ_i^{642} \quad (\text{Gleichung 76})$$

mit  $p_i$ : Wahrscheinlichkeit der W-Verteilung  $p_i = P(X = x_i)$

$\sigma^2$  Varianz<sup>643</sup> der Durchlaufzeit  $var(DLZ)$  [-]

$$var(DLZ) := E((X - \mu)^2)^{644} \quad (\text{Gleichung 77})$$

Die Streuung führt dazu, dass manche Aufträge innerhalb des Toleranzfensters nicht fristgerecht fertig gestellt werden können und umgekehrt manche Aufträge außerhalb des Fensters dennoch rechtzeitig ausgeliefert werden können. Somit erreicht die Kennlinie der Termintreue weder 0% noch 100%.<sup>645</sup>

Ergänzt um den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge wird die bestehende Gleichung 75 um den Einflussfaktor  $E_{xyT}$  multiplikativ erweitert (siehe Gleichung 78). Der Einflussfaktor  $E_{xyT}$  wirkt sich somit erhöhend (steilerer Kurvenverlauf) oder vermindern (flacherer Kurvenverlauf) auf die Termintreue  $T$  aus, je nachdem ob ein negativer oder positiver Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss vorliegt.

$$T_{Los}(DLZ) := T(DLZ) \cdot E_{xyT} \quad (\text{Gleichung 78})$$

wobei

$T_{Los}$  Termintreue unter Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss [%]

Generell kann der wie in Abbildung 78 dargestellte Kennlinienverlauf der Termintreue  $T_{Los}$  in Abhängigkeit von der Durchlaufzeit als normalverteilt angenommen werden. Die Kennlinie besagt, dass die Termintreue  $T_{Los}$  mit zunehmender Durchlaufzeit aufgrund entstehender Wartezeiten bei zunehmender Auslastung des Systems und dem dadurch bedingten Sinken der Lieferflexibilität bzw. Flexibilität der kurzfristigen Einlastung ungeplanter Aufträge abnimmt. Die „Wanderung der Kurve“ nach oben oder unten ist durch den Einflussfaktor  $E_{xyT}$  bedingt (siehe Gleichung 78).

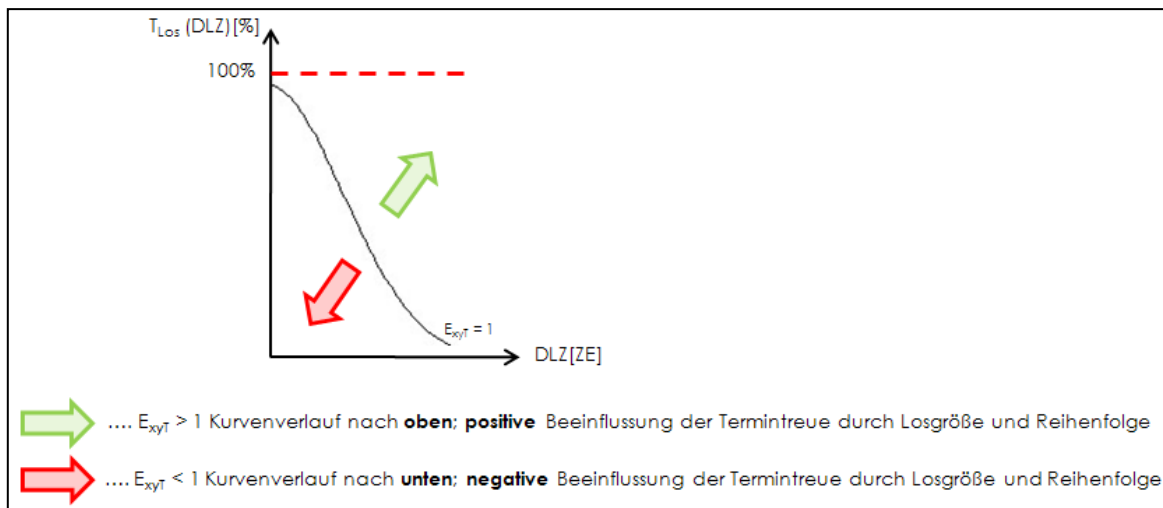
<sup>641</sup> Der Erwartungswert entspricht der erwarteten Durchlaufzeit.

<sup>642</sup> Vgl. Steland (2010), S. 97 f.

<sup>643</sup> Die Varianz gibt die Streuung der Durchlaufzeiten an.

<sup>644</sup> Vgl. Steland (2010), S. 99.

<sup>645</sup> Vgl. Lödging (2008), S. 225.



**Abbildung 78: Kennlinienverlauf Termintreue und Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss<sup>646</sup>**

So führt ein Einflussfaktor  $E_{xyT} > 1$  zu einer Verschiebung des Kurvenverlaufs nach oben (im Vergleich zur Kennlinie bei  $E_{xyT} = 1$ ), was impliziert, dass eine positive Beeinflussung der Termintreue durch die gewählte Produktionslosgröße und Reihenfolge vorliegt. Hingegen führt ein  $E_{xyT} < 1$  zu einer Wanderung der Kurve nach unten und resultiert somit in einer negativen Beeinflussung bzw. Auswirkung auf die Zielgröße.

## 2. Durchlaufzeit:

Es gilt, dass die Durchlaufzeit eines Fertigungsauftrages mit steigender Auslastung und zunehmenden Beständen eines Produktionssystems aufgrund entstehender Wartezeiten vor den Aggregaten zunimmt (siehe Kennlinienverlauf in Abbildung 78). Der Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Durchlaufzeit und den mittleren Beständen bzw. der mittleren Leistung eines Systems wird laut Kennlinientheorie durch Gleichung 79<sup>647</sup> beschrieben.

$$DLZ_m := \frac{B_m}{L_m} \quad (\text{Gleichung 79})$$

wobei

$DLZ_m$  mittlere gewichtete Durchlaufzeit [ZE]

$B_m$  mittlerer Bestand [ME]

$L_m$  mittlere Leistung [ME/ZE]

Um die Auswirkungen bzw. den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge darin abzubilden, wird die Gleichung 79 um den Einflussfaktor  $E_{xyD}$  erweitert (siehe Gleichung 80).

$$DLZ_{m\ Los} := DLZ_m \cdot E_{xyD} \quad (\text{Gleichung 80})$$

wobei

<sup>646</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>647</sup> Vgl. Arnold et al. (2008), S. 240 f. und siehe ausführlich dazu S. 79 f.

$DLZ_{mLos}$  mittlere gewichtete Durchlaufzeit unter Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss [ZE]

Durch die Zielgröße  $DLZ_{mLos}$  kann nun der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die mittlere gewichtete Durchlaufzeit dargestellt werden (siehe Abbildung 79). So führt ein Einflussfaktor  $E_{xyD} < 1$  zu einer positiven Beeinflussung der Durchlaufzeit aufgrund der gewählten Losgrößen- und Reihenfolgeplanung und bewirkt eine Wanderung der Kurve nach unten. Hingegen verschiebt sich die Kurve aufgrund einer weniger geeigneten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl, ausgedrückt durch einen Faktor  $E_{xyD} > 1$ , nach oben, so resultiert dies in einer längeren Durchlaufzeit und somit in einer Verschlechterung.

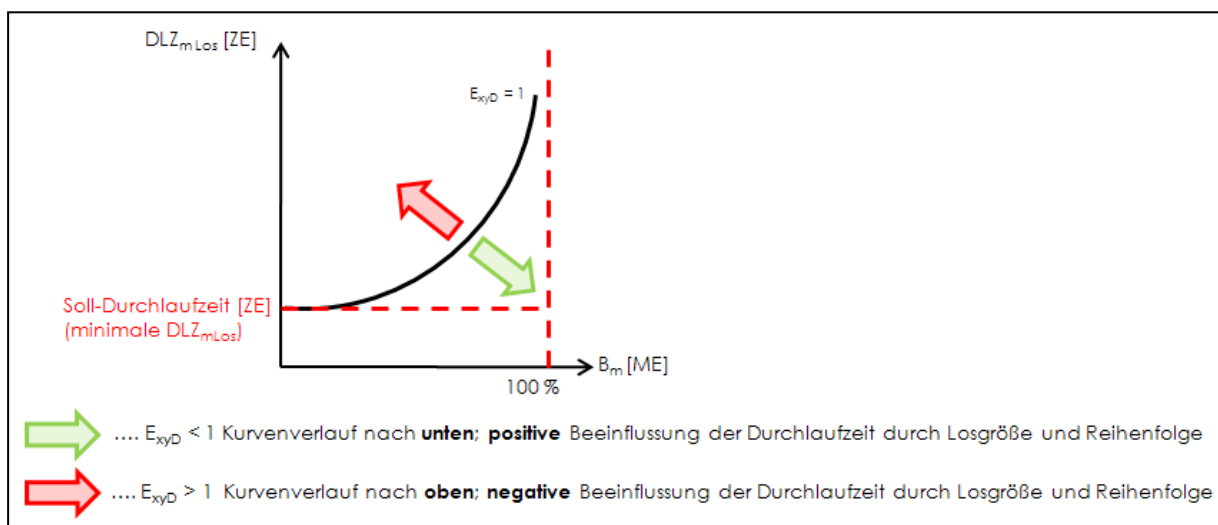


Abbildung 79: Kennlinienverlauf Durchlaufzeit unter Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss<sup>648</sup>

### 3. Produktmix:

Der Produktmix, welchen es zu erzeugen gilt, führt je nachdem, welchen Wert der Varianten-erzeugungskoeffizient  $V_x$  annimmt, zu einer positiven ( $V_x > 1$ ) oder negativen ( $V_x < 1$ ) Beeinflussung der anderen Zielgrößen. Je größer  $V_x$  ist, desto größer ist die erzeugte Produktionsmenge bei einer geringeren Anzahl an Umstellungen auf einem Aggregat. Dies wirkt sich neben der wirtschaftlicheren Realisierung des Produktionsprogramms (resultiert in geringeren Herstellkosten; geringerer Kennlinienanstieg) auch positiv auf die Durchlaufzeit, durch eine Verkürzung dieser aufgrund geringerer Rüst- und Wartezeiten sowie der Termintreue, aufgrund der Möglichkeit der termingerechten Realisierung der gewünschten Kundenaufträge, die Auslastung der Aggregate (geringere Leerkosten) und den Umstellaufwand (Reduzierung der Rüstvorgänge und -kosten und damit geringeren Auftragswechselkosten) aus. Da keine logistische Kennlinie zur Veranschaulichung des Produktmixes existiert, werden in der nachfolgenden Abbildung 80 die Herstellkosten je Mengeneinheit, der Produktionsmenge je Aggregat gegenübergestellt, um so den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die Herstel-

<sup>648</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

lung des Produktmixes (ersichtlich in der Steigung des Abfalls der Hyperbel) graphisch zu veranschaulichen.

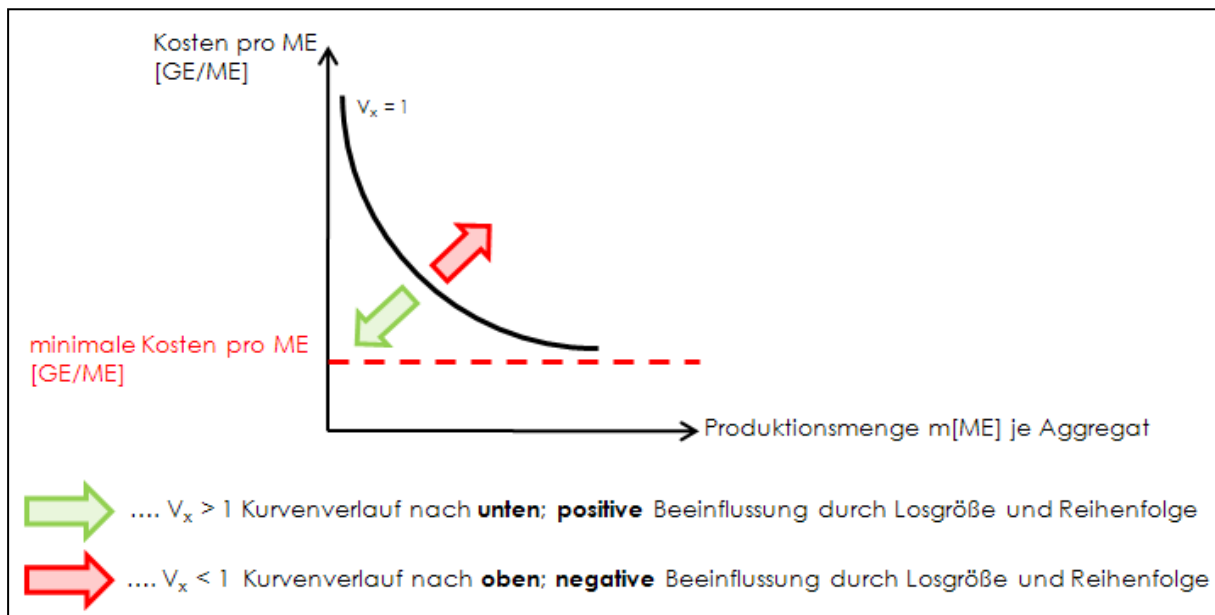


Abbildung 80: Kennlinie Produktmix unter Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss<sup>649</sup>

Wie in Abbildung 80 dargestellt, kann eine geeignete Wahl der Losgröße und Reihenfolge zur wirtschaftlicheren Realisierung des Produktmixes bei geringeren (fixen) Herstellkosten pro Variante (bei  $V_x > 1$ ) (Stückkostendegression) führen. Hingegen resultiert eine ungeeignete Wahl der Losgröße und Reihenfolge in einem Anstieg der Herstellkosten pro Variante aufgrund der ausbleibenden Fixkostendegression ( $V_x < 1$ ) und ist somit für die Herstellung des benötigten Produktmixes ungeeigneter.

#### 4. Auslastung:

Die bestandsabhängige Auslastung  $A_m(B)$  eines Arbeitssystems wird in der Kennlinientheorie durch den Zusammenhang zwischen der mittleren Leistung  $L_m(B)$  und der maximal möglichen Leistung  $L_{max}$  beschrieben (siehe Gleichung 81).<sup>650</sup>

$$A_m(B) := \frac{L_m(B)}{L_{max}} \cdot 100 \quad (\text{Gleichung 81})$$

wobei

$A_m(B)$  bestandsabhängige Auslastung eines Arbeitssystems [%]

$L_m(B)$  mittlere Leistung [ME/ZE]

$L_{max}$  maximal mögliche Leistung [ME/ZE]

<sup>649</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>650</sup> Siehe dazu ausführlich S. 79 f.

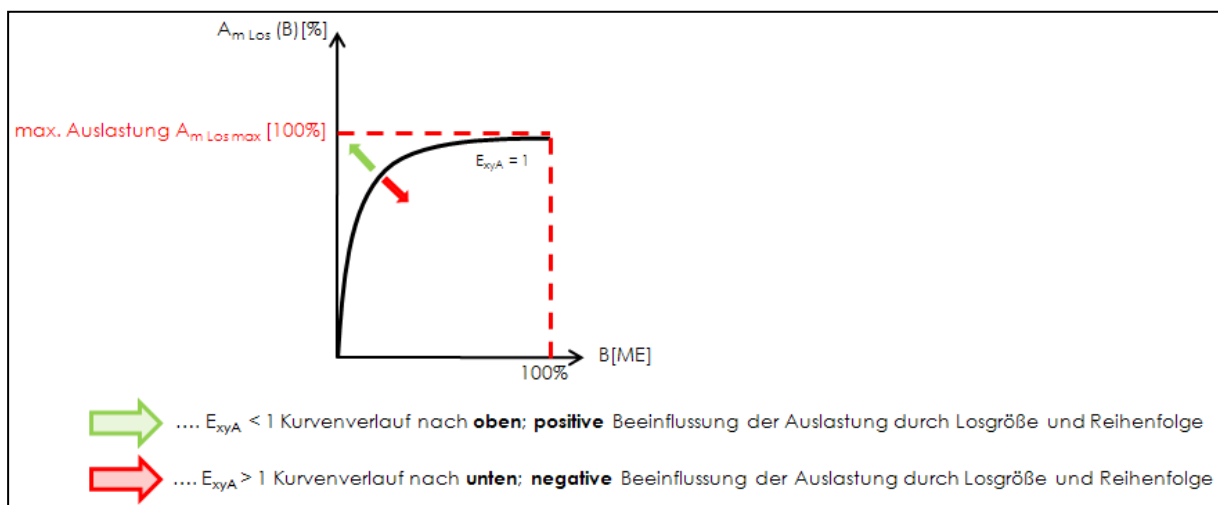
Um den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf den Kennlinienverlauf darstellen zu können, wird die bestehende Gleichung 81 um den Einflussfaktor  $E_{xyA}$  (siehe dazu Gleichung 82) erweitert.

$$A_{m\ Los}(B) := A_m(B) \cdot \frac{1}{E_{xyA}} \quad (\text{Gleichung 82})$$

wobei

$A_{m\ Los}(B)$  bestandsabhängige Auslastung eines Arbeitssystems unter Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss [%]

Generell gilt, dass die bestandsabhängige Auslastung eines Aggregates  $A_{m\ Los}(B)$  mit zunehmendem Bestand  $B$  steigt und dabei die Leerkosten eines Aggregats sinken.



**Abbildung 81: Kennlinienverlauf Auslastung unter Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss<sup>651</sup>**

Wie in Abbildung 81 dargestellt, führt ein Einflussfaktor  $E_{xyA} < 1$  zu einer positiven Beeinflussung durch die gewählte Produktionslosgröße und Reihenfolge und resultiert in einer höheren Auslastung des Arbeitssystems. Ein Einflussfaktor von  $E_{xyA} > 1$  hingegen impliziert eine schlechtere Auslastung und somit steigende Leerkosten.

## 5. Bestand:

Der mittlere Bestand laut Kennlinientheorie ist wie folgt definiert (siehe dazu Gleichung 83)<sup>652</sup>:

$$B_m := DLZ_m \cdot L_m \quad (\text{Gleichung 83})$$

wobei

$B_m$  mittlerer Bestand in einem Arbeitssystem [ME]

$DLZ_m$  mittlere gewichtete Durchlaufzeit eines Auftrages [ZE]

$L_m$  mittlere Leistung [ME/ZE]

<sup>651</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>652</sup> Vgl. Arnold et al. (2008), S. 240 f. und siehe ausführlich dazu S. 79 f.



Wird der in Gleichung 83 erläuterte Zusammenhang um den Einflussfaktor  $E_{xyB}$  ergänzt (siehe Gleichung 84), kann der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf den Kennlinienverlauf des mittleren Bestands dargestellt werden.

$$B_{m Los} := B_m \cdot E_{xyB} \quad (\text{Gleichung 84})$$

wobei

$B_{m Los}$  mittlerer Bestand unter Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss [ME]

Dies impliziert, dass durch die geeignete Wahl der Produktionslosgröße und Reihenfolge (ausgedrückt durch einen Faktor  $E_{xyB} < 1$ ) eine Minimierung des mittleren Bestands (bei kürzeren Durchlaufzeiten) erzielt werden kann. Hingegen steigen der mittlere Bestand (mit zunehmender Durchlaufzeit) und somit auch die Lagerhaltungs- und Kapitalbindungskosten bei einem Faktor von  $E_{xyB} > 1$  an (siehe dazu Abbildung 82).

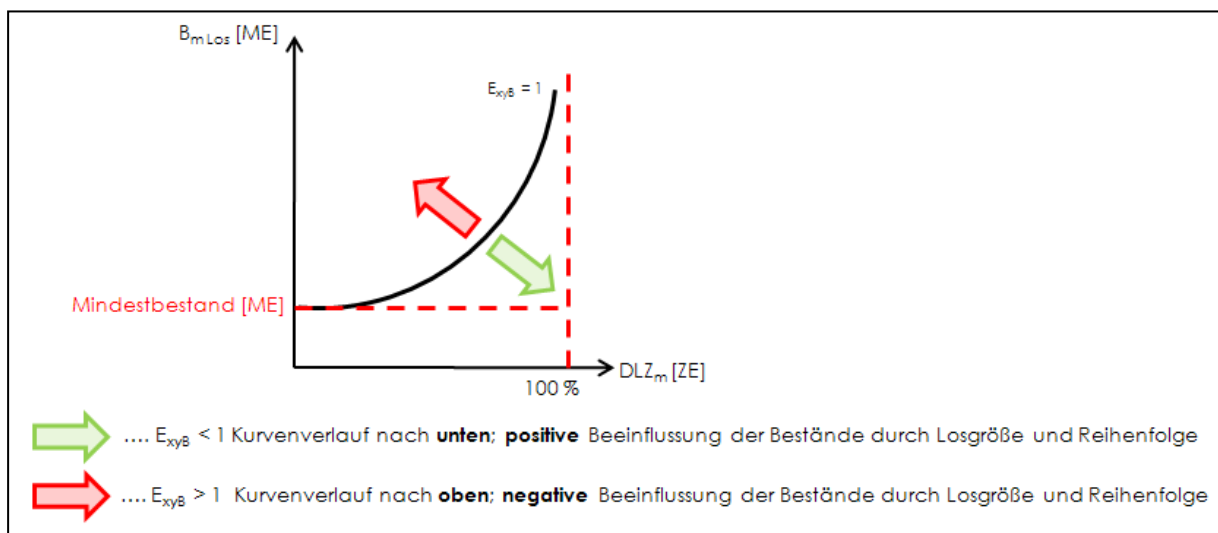


Abbildung 82: Kennlinienverlauf Bestand unter Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss<sup>653</sup>

Ziel sollte es daher sein einen möglichst geringen Bestand im Arbeitssystem bei einer kurzen Durchlaufzeit zu erreichen.

## 6. Umstellaufwand:

Der Umstellaufwand, welcher anhand der Dauer der Rüst-, Umstell-, Einstell- und Justiervorgänge (in Zeiteinheiten) und den dadurch entstehenden Kosten bewertet werden kann, resultiert bei einer ungeeigneten Wahl der Produktionslosgröße und Reihenfolge in einem Anstieg der Auftragswechselkosten, was durch den Einflussfaktor  $E_{xyU}$  beschrieben wird. Je größer der Einflussfaktor  $E_{xyU}$  ist, desto größer sind auch der Umstellaufwand und die daraus resultierenden Herstellkosten (bei einer niedrigeren Auslastung des Produktionssystems). In Abbildung 83 ist der Zusammenhang zwischen den Herstellkosten und der Durchlaufzeit eines Auftrages dargestellt.

<sup>653</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Dieser besagt, dass bei einem Wert von  $E_{xyU} < 1$  ein geringerer Umstellaufwand auftritt und somit die Produktion mit geringeren Herstellkosten in einer kürzeren Durchlaufzeit (bei einer höheren Auslastung) realisiert werden kann. Hingegen führt ein Faktor von  $E_{xyU} > 1$  zu einem höheren Umstellaufwand und damit zu einem Anstieg der Herstellkosten sowie der Durchlaufzeit (bei einer niedrigeren Auslastung). Anzumerken sei an dieser Stelle, dass auch der Fertigungsbestand mit zunehmendem Umstellaufwand steigt.

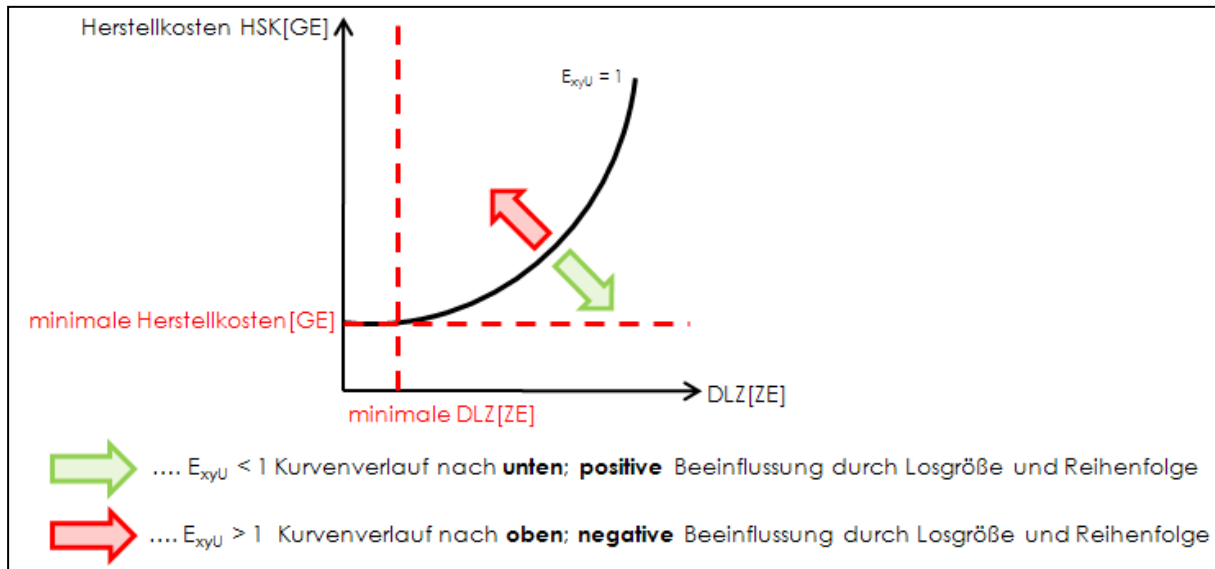


Abbildung 83: Kennlinie-Umstellaufwand-Herstellkosten unter Produktionslos- und Reihenfolgeeinfluss<sup>654</sup>

### 4.3.2 Kennlinienverläufe hybrider Produktionssysteme unter Berücksichtigung der Produktionslosgröße und Reihenfolge

Die in 4.3.1 dargestellten Kennlinien werden nun im folgenden Abschnitt in einer Darstellung zusammengefasst, um die gegenseitigen Wechselwirkungen der einzelnen Zielgrößen darzustellen. Im Anschluss daran folgt die Entwicklung der Kennlinienverläufe für ein hybrides Produktionssystem, mit Hilfe derer der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem abgebildet werden kann. Hierbei werden auch die Interdependenzen der mehrstufigen Fertigung sowie die Abhängigkeiten der nachgelagerten Stoffumformungsprozesse durch die vorgelagerte Stoffumwandlung berücksichtigt. Alle vorgestellten Modelle werden anhand der in 4.3.1 beschriebenen Situationen 1 bis 3 diskutiert.

#### Gesamtmodell der Kennlinienverläufe unter Berücksichtigung des Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinflusses

Die nachfolgende Abbildung 84 stellt die Kennlinienverläufe der Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue in Abhängigkeit des Bestands sowie die „Wanderung der Kennlinien“, bedingt durch den Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge, welcher durch die Einfluss-

<sup>654</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

faktoren beschrieben wird, dar. Aufgrund der Erweiterung der bestehenden Ansätze der Kennlinientheorie um die Einflussfaktoren des Bewertungsinstrumentariums ergibt sich eine positive oder negative Beeinflussung durch die Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung, welche je nachdem in einem steileren oder flacheren Anstieg des Kurvenverlaufs resultiert. Ebenso sind in der nachfolgenden Abbildung die anfallenden Gesamtkosten dargestellt, wobei diese aus der Addition der fixen Kostenanteile, welche einen degressiven Verlauf annehmen und den Lagerhaltungs- und Kapitalbindungskosten, welche proportional mit dem Bestand ansteigen, resultieren. Hierbei ist ein schwach ausgeprägtes Minimum erkennbar, welches bei den anfallenden Stückkosten in Abhängigkeit der gewählten Losgröße und Reihenfolge aufgrund der Minimierung des Umstellaufwands auftritt.

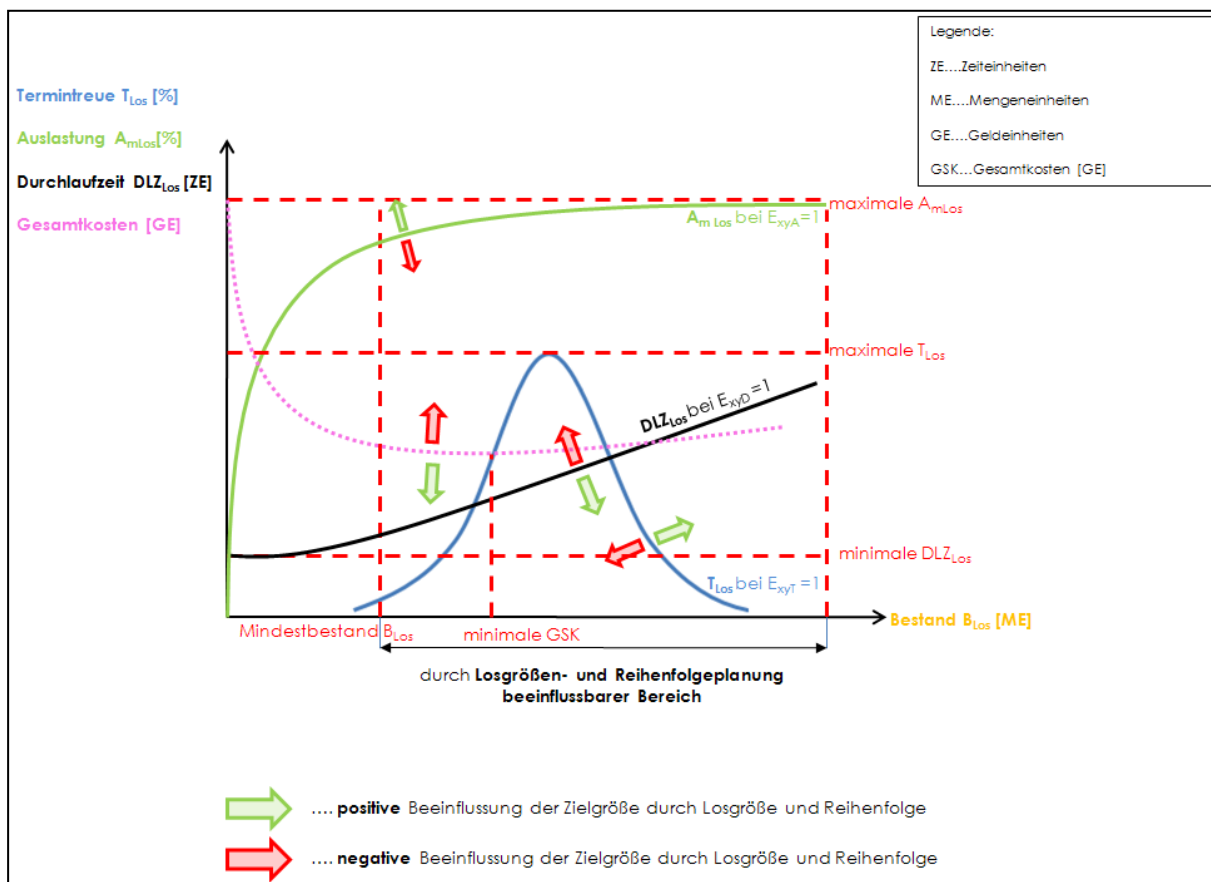


Abbildung 84: Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinfluss auf logistische Kennlinien<sup>655</sup>

In Abbildung 85 ist den Verlauf der Herstellkosten in Abhängigkeit vom Produktmix und den Umstellaufwand dargestellt, welche sich ähnlich der Durchlaufzeit verhalten. Je größer der zu erzeugende Produktmix ist, desto höher ist der damit verbundene Umstellaufwand, was in einem Anstieg der Durchlaufzeit aufgrund längerer Rüst-, Einstell-, Justier- und Wartezeiten resultiert.

<sup>655</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin; in Anlehnung an Arnold et al. (2008), S. 240.

Dies lässt den Schluss zu, dass durch die Bestimmung bzw. Beurteilung der Auswirkungen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl auf die Durchlaufzeit ebenso auf die Auswirkungen auf den Produktmix und den Umstelllaufwand geschlossen werden kann.

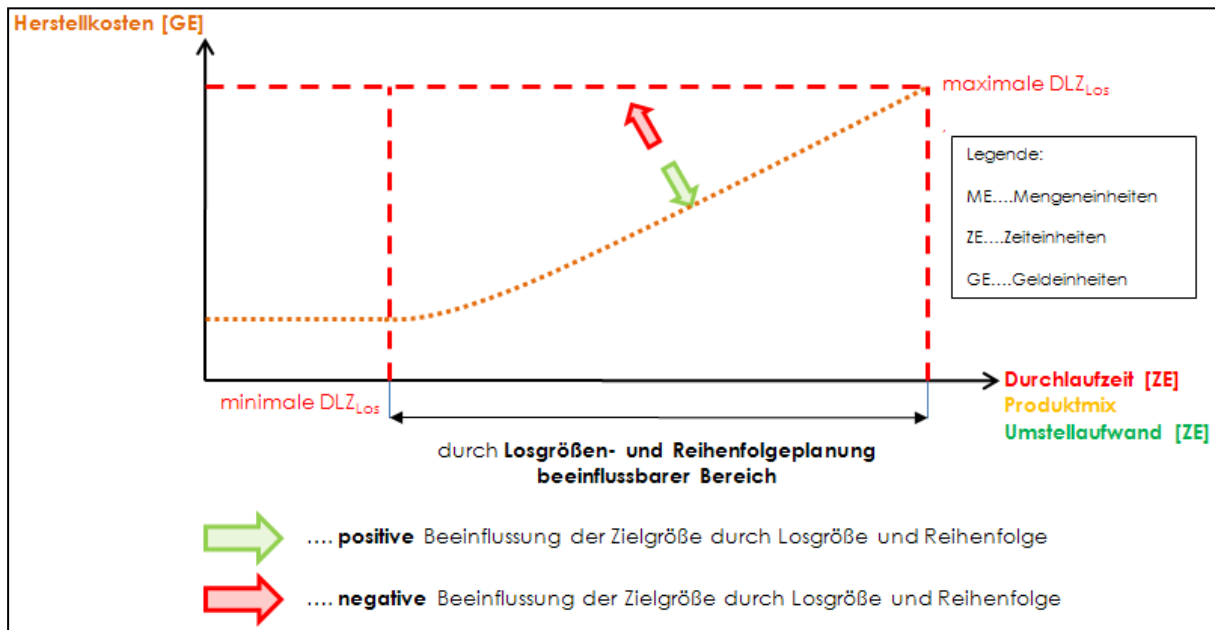


Abbildung 85: Herstellkosten bei zunehmendem Produktmix und Umstelllaufwand<sup>656</sup>

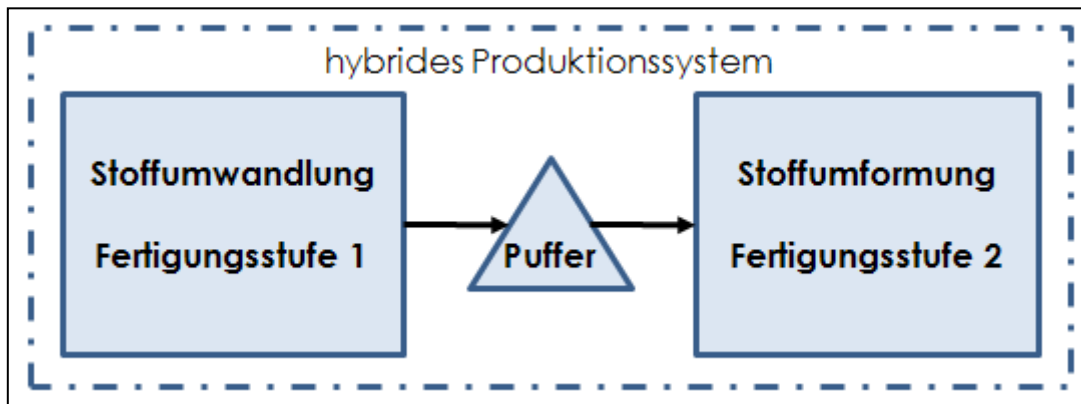
Nachfolgend werden nun die Kennlinienverläufe für die in hybriden Produktionssystemen auftretenden Situationen (siehe dazu Abschnitt 4.2.1) erläutert:

#### Kennlinienverläufe logistischer Zielgrößen – Situation 1:

Bei der ersten möglichen Situation, welche in einem hybriden Produktionssystem in Erscheinung tritt, wird die bei der Stoffumwandlung auftretende Produktionslos- bzw. Chargengröße inputseitig durch die maximale Füllkapazität des Aggregats bestimmt, welches kontinuierlich an die nachgelagerten Stoffumformungsaggregate weitergegeben wird. In diesem Fall wird von einer Los- bzw. Chargengröße von eins gesprochen, welche keinen Einfluss auf die logistischen Zielgrößen bei der Stoffumwandlung ausübt und daher keine Veränderung der Kennlinienverläufe bewirkt. Die logistischen Zielgrößen werden in diesem Fall nur durch die Maximalkapazität des Stoffumwandlungsaggregats (beispielsweise eines Schacht- oder Hochofens) bestimmt und nehmen daher in der Regel einen konstanten Wert an. Die Inputmenge des vorgeschalteten Stoffumwandlungsaggregats beeinflusst jedoch die logistischen Zielgrößen der nachgelagerten Stoffumformung. Durch den Einsatz so genannter Pufferaggregate, welche zwischen Stoffumwandlung und anschließender Stoffumformung (beispielsweise in Form von Warmhalteöfen etc.) zwischengeschaltet werden (siehe Abbildung 86), kann eine gezieltere Beeinflussung der logistischen Zielgrößen erfolgen. Damit ist eine Verbesserung der Auslastung der Stoffumformungsaggregate und somit auch eine Senkung der Herstellkosten realisierbar, da etwaige Leer- und Wartezeiten an den Stoffumformungsaggregaten minimiert

<sup>656</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

und durch eine flexiblere Einlastung in die Stoffumformungsaggregate der Umstelllaufwand und somit die Auftragswechselkosten (beispielsweise durch die Bündelung von Aufträgen) reduziert werden können.



**Abbildung 86: Puffer an der Schnittstelle Stoffumwandlung - Stoffumformung<sup>657</sup>**

Jedoch muss beachtet werden, dass die Zwischenlagerung der Halbfabrikate im Puffer zu einem (kurzfristigen) Anstieg der Kapitalbindungskosten führen kann. Daher bedarf es in dieser Situation der zusätzlichen Betrachtung der Kapitalbindungskosten (des Puffers sowie der Fertigungsstufen 1 und 2) sowie der Leer- und Auftragswechselkosten (fallen überwiegend nur bei Fertigungsstufe 2 an). Ebenso müssen eventuelle Fehlmengenkosten (aufgrund Lieferverzögerungen, Nacharbeiten etc.) Berücksichtigung finden.

Zusammengefasst lässt sich dies für Situation 1 wie folgt definieren (siehe dazu Gleichung 85):

$$\min (K_B + K_L + K_A + K_F) := 0 \quad (\text{Gleichung 85})$$

wobei

$K_B$  Kapitalbindungskosten [GE]

$K_L$  Leerkosten [GE]

$K_A$  Auftragswechselkosten [GE]

$K_F$  Fehlmengenkosten [GE]

In der nachfolgenden Abbildung 87 sind die in der Situation 1 auftretenden Kennlinienverläufe in Abhängigkeit von der Durchlaufzeit in Zeiteinheiten [ZE] skizziert. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass es sich dabei um eine schematische Darstellung handelt und die in realen Betriebssituationen auftretenden Kennlinien hinsichtlich ihrer Verläufe von den hier Skizzierten abweichen können.

<sup>657</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

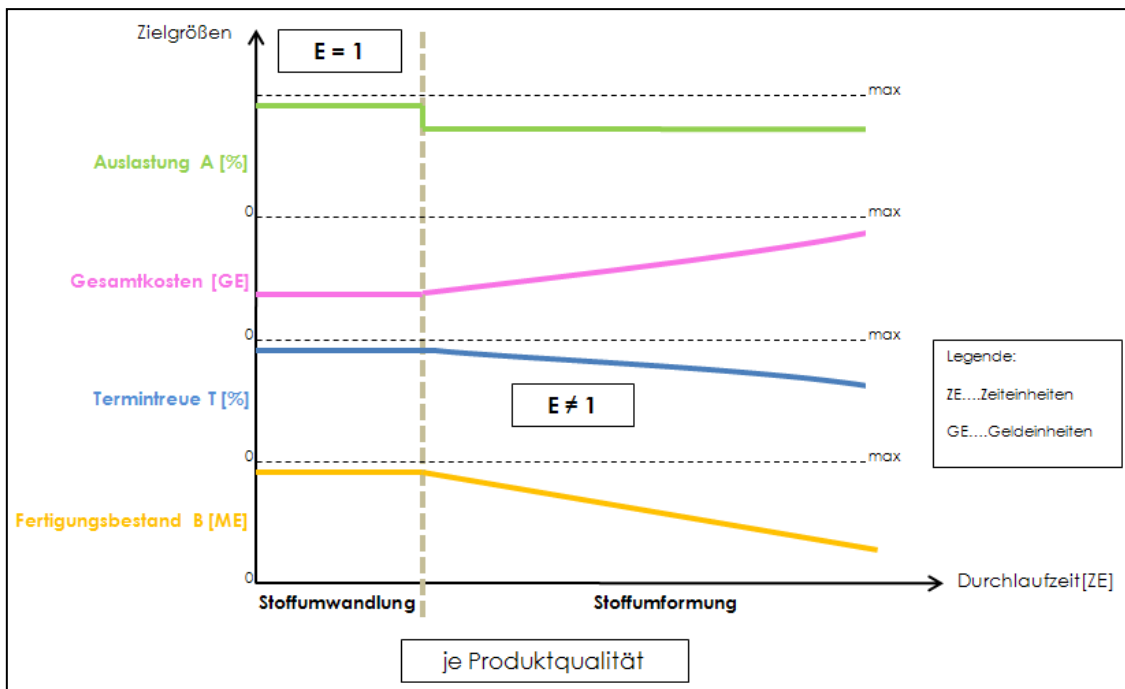


Abbildung 87: Kennlinienverläufe - Situation 1<sup>658</sup>

Dabei lässt sich erkennen, dass bei der kontinuierlichen Stoffumwandlung, bei normaler Betriebsituation vorausgesetzt, die Auslastung, der Fertigungsbestand, die Termintreue und auch die anfallenden Gesamtkosten einen konstanten Verlauf aufweisen. Die Einflussfaktoren  $E$  der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen nehmen hier per Definition den Wert 1 an, da diese durch die maximale Füllkapazität bestimmt werden. Hingegen im Bereich der diskontinuierlichen Stoffumformung verändern sich die Kennlinienverläufe der einzelnen Zielgrößen: Die Auslastung der Stoffumformungsaggregate wird im Vergleich zur Stoffumwandlung aufgrund auftretender Warte-, Rüst- oder Leerzeiten einen geringeren Wert annehmen und auch die Termintreue zeigt einen leicht abfallenden Verlauf (im Vergleich zur Stoffumwandlung). Aufgrund entstehender Wartezeiten und dadurch bedingter Leerzeiten sowie etwaiger anfallender Auftragswechselkosten kann davon ausgegangen werden, dass die Gesamtkosten ansteigen. Die Höhe der Bestände an Halbfabrikaten wird durch die Puffergröße der Zwischenaggregate bestimmt und der Fertigungsbestand nimmt mit zunehmender Produktionszeit bei der Stoffumformung ab. Angemerkt sei, dass die Veränderungen der Steigungen der einzelnen Kennlinien (positive sowie negative) aus den auftretenden Einflussfaktoren ( $E \neq 1$ ) je herzustellender Produktqualität resultieren.

Kennlinienverläufe logistischer Zielgrößen – Situation 2:

In der zweiten Situation, welche ein hybrides Produktionssystem annehmen kann, werden die Produktionlos- bzw. Chargengrößen der Stoffumformungsprozesse durch den kontinuierlichen, mengenmäßig variablen Output der Stoffumwandlung je Produktqualität beeinflusst. Dies

<sup>658</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

impliziert, dass hierbei durch die kontinuierliche Weitergabe unterschiedlicher Mengen von der Stoffumwandlung an die Stoffumformung ein Einfluss durch die gewählte Produktionslos- bzw. Chargengröße (Kampagne) und Herstellungsreihenfolge auf die Kennlinienverläufe sowohl bei der Stoffumwandlung als auch bei der Stoffumformung je Produktqualität beobachtet werden kann. Je nachdem welche Menge an Output weitergegeben wird, erfolgt die Chargenbildung im Zuge der Stoffumformung, welche die Einflussfaktoren  $E$  bestimmt und somit zu einem positiven oder negativen Verlauf der Kennlinien führt (siehe dazu schematische Darstellung der Kennlinienverläufe der zweiten Situation in Abbildung 88).

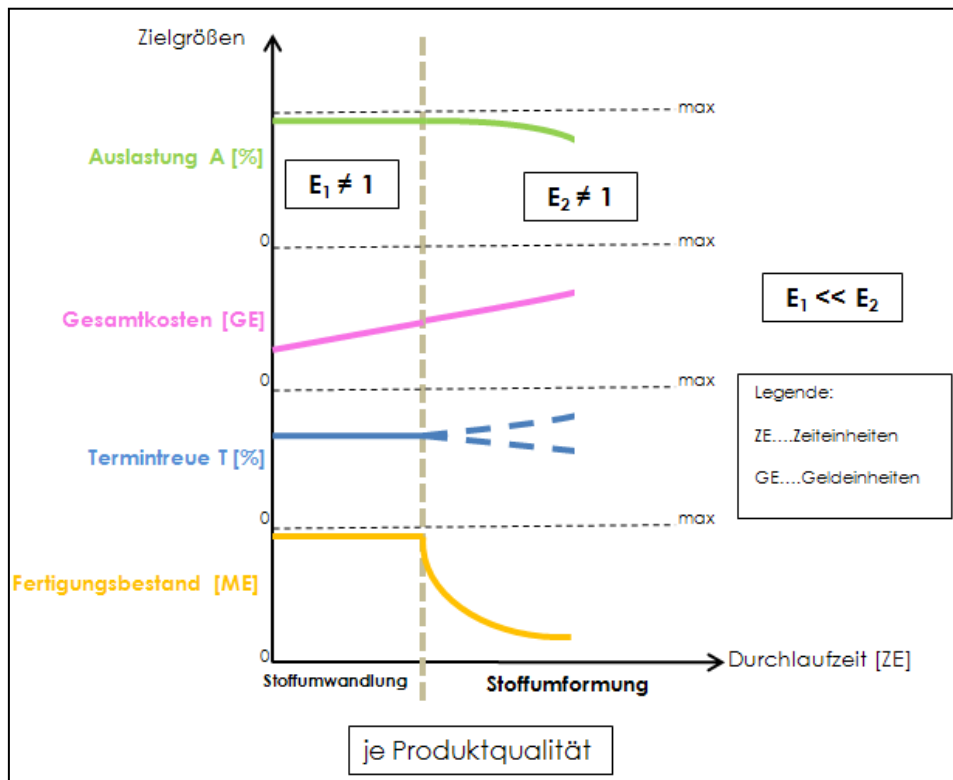


Abbildung 88: Kennlinienverläufe - Situation 2<sup>659</sup>

Wie in Abbildung 88 dargestellt, werden die Kennlinien je Produktqualität bei der Stoffumwandlung durch die Kampagnengröße bestimmt und nehmen in Abhängigkeit dieser annähernd konstante Werte an. Dies impliziert, dass die Zielgrößen im Zuge der Stoffumwandlung einem deutlich geringeren Einfluss der Produktionslos- bzw. Chargengröße und Reihenfolge, als die Zielgrößen der Stoffumformungsprozesse (ausgedrückt in Abbildung 88 durch  $E_1 \ll E_2$ , wobei  $E_1$  den Gesamteinfluss der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen der Stoffumwandlung und  $E_2$  jenen für die Stoffumformung repräsentieren) unterliegen. Beachtung hat die Tatsache zu finden, dass die Umstellung von einer Produktqualität auf eine andere (Kampagnenwechsel bei der Stoffumwandlung) zu einem kurzfristigen Abfall der Auslastung und des Fertigungsbestands führen kann. Bei der Stoffumformung wird die Auslastung der Aggregate mit zunehmender Durchlaufzeit im Vergleich zur Stoffumwandlung

<sup>659</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

sinken. Hingegen steigen die Gesamtkosten mit zunehmender Produktionszeit an, was im Anstieg etwaiger Leer- und Rüstkosten begründet ist. Der Kennlinienverlauf der Termintreue kann aufgrund von Wartezeiten steigen oder sinken (in Abhängigkeit der Einflussfaktoren  $E$ ). Die Fertigungsbestände nehmen bei der Stoffumformung einen kontinuierlich sinkenden Verlauf an, wobei der Abfall der Kennlinie durch die Zeitintervalle der Outputweitergabe des Stoffumwandlungsaggregats bestimmt wird.

Kennlinienverläufe logistischer Zielgrößen – Situation 3:

In der dritten Situation wird eine durch verfahrenstechnische Vorschriften bestimmte Produktionsmenge, welche in variierbaren Zeitabständen von den Stoffumwandlungs- an die Stoffumformungsaggregate weitergereicht wird, erzeugt. Dies impliziert, dass sich die herzustellenden Qualitäten hinsichtlich der Menge, welche jedoch nicht mittels produktionslogistischen Maßnahmen steuerbar sind, als auch in den Zeitabständen der Outputweitergabe an die nachgelagerten Aggregate der Stoffumformung differenzieren und somit die Kennlinienverläufe je Produktqualität stark variieren können. In der nachfolgenden Abbildung 89 kann daher nur ein genereller Trend der Kennlinienverläufe in Abhängigkeit von der Durchlaufzeit je Produktqualität dargestellt werden, wobei auch hier der Gesamteinfluss der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen der Stoffumwandlung erheblich kleiner ist, als auf jene der Stoffumformungsprozesse (ausgedrückt durch  $E_1 \ll E_2$ ).

Dabei ist ersichtlich, dass sich die Auslastung und die Fertigungsbestände bei der Stoffumformung in Abhängigkeit der Stoffumwandlung verhalten, was jedoch auch hierbei durch das Zwischenschalten von Puffern ausgeglichen bzw. beeinflusst werden kann. Die Gesamtkosten werden über die Durchlaufzeit steigen und die Termintreue wird bei der Stoffumwandlung einen konstanten Verlauf annehmen. Im Zuge der Stoffumformung kann die Termintreue entweder einen positiven oder einen negativen Verlauf aufweisen.



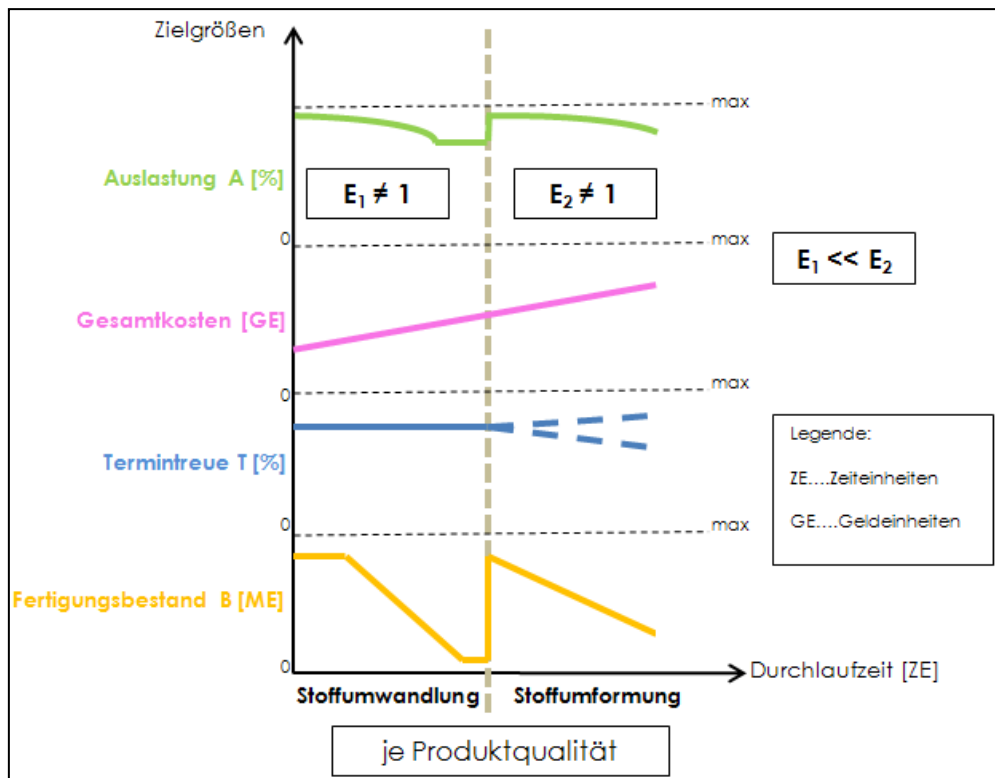


Abbildung 89: Kennlinienverläufe - Situation 3<sup>660</sup>

Abschließend sei angemerkt, dass allen drei Situationen gemein ist, dass die Kennlinienverläufe der Stoffumformung durch die vorgelagerte Stoffumwandlung maßgeblich beeinflusst werden und daher sowohl bei der Produktionsplanung selbst, als auch bei der Abbildung der Zielgrößen eines hybriden Produktionssystems die Interdependenzen zwischen Stoffumwandlung und Stoffumformung unbedingt zu berücksichtigen sind.

Im Anschluss wird nun ein Vorgehenskonzept vorgestellt, mit Hilfe dessen die Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl auf die Zielgrößen eines hybriden Produktionssystems erfolgen kann.

#### 4.4 Vorgehenskonzept zur Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem

Im Folgenden wird ein Vorgehenskonzept vorgestellt, welches die Abstimmung der Produktionslosgröße bzw. Chargengröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen in einem hybriden Produktionssystem ermöglicht. Das entwickelte Vorgehenskonzept beruht auf dem in Abschnitt 4.2.4 entwickelten Bewertungsinstrumentarium und ermöglicht die Beantwortung der Fragestellung, wie die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung zu erfolgen hat um eine bes-

<sup>660</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

sere Abstimmung dieser hinsichtlich einer spezifischen Zielgröße oder eine Gesamtverbesserung mehrerer betrachteter Zielgrößen zu erzielen.

Bevor die einzelnen Teilschritte des Vorgehenskonzepts im Detail vorgestellt werden, wird in Abbildung 90 zunächst ein Überblick über das entwickelte „Werkzeug“ gegeben:

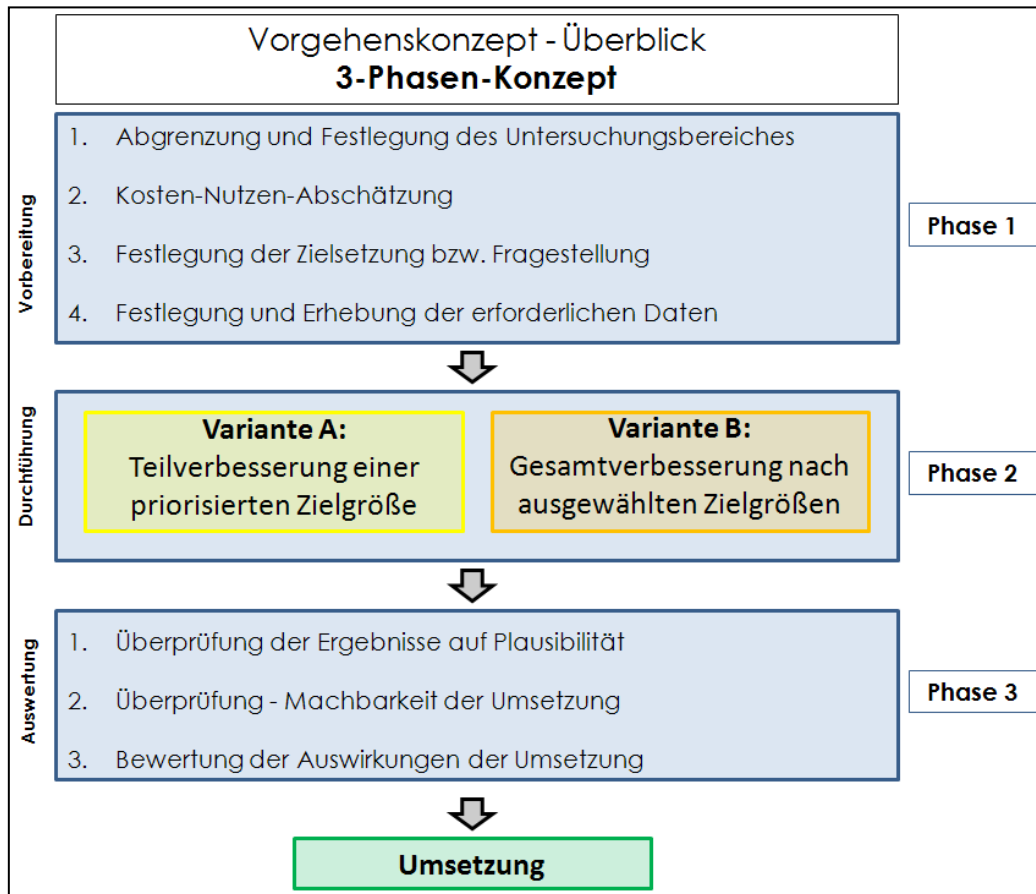


Abbildung 90: Überblicksdarstellung - Vorgehenskonzept<sup>661</sup>

Das Vorgehenskonzept umfasst dabei drei Phasen: die Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung.

### **Phase 1 - Vorbereitung:**

In der ersten Phase – der Vorbereitung – sind alle Tätigkeiten und Vorarbeiten, welche zur Durchführung des Abstimmungsprozesses der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen eines hybriden Produktionssystems notwendig sind, zu erbringen. Ebenso muss in dieser Phase die essentielle Entscheidung getroffen werden, ob der Einsatz des 3-Phase-Konzepts für die jeweils vorliegende Situation sinnvoll ist und in wirtschaftlichem Ausmaß realisiert werden kann.

Die Vorbereitungsaktivitäten, welche zu Beginn erfolgen, umfassen (siehe dazu auch Abbildung 91):

<sup>661</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

### *1. Abgrenzung und Festlegung des Untersuchungsbereiches*

Hierbei erfolgt die Festlegung der Systemgrenzen, -schnittstellen, -elemente und darin herrschenden Wechselwirkungen und Gegebenheiten. Im Hinblick auf ein hybrides Produktionssystem muss ermittelt werden, welche Situation bei der Stoffumwandlung (Fall I, Fall II oder Fall III) vorherrscht und inwiefern dort ein Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss gegeben ist. Ebenso hat die Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen der Stoffumwandlung und der anschließenden Stoffumformung zu geschehen. Erlangt man dabei zur Erkenntnis, dass von Seiten der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung kein relevanter Einfluss auf die logistischen Zielgrößen gegeben ist, hat dies eine negative Entscheidung bezüglich der Durchführung des 3-Phasen-Konzepts zur Folge. Impliziert die Abgrenzung und Analyse des betrachteten Systems einen Einfluss der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die Zielgrößen, so muss in weiterer Folge eine Kosten-Nutzen-Abschätzung geschehen. Die erfolgreiche Durchführung des ersten Punktes der Vorbereitungsphase setzt das Mitwirken produktionskundiger und erfahrener Mitarbeiter des Unternehmens voraus.

### *2. Kosten-Nutzen-Abschätzung*

Als nächstes muss eine Kosten-Nutzen-Abschätzung vorgenommen werden, in welcher die Kosten, welche aufgrund der Durchführung der Analyse (in erster Linie werden dabei Personalkosten anfallen) entstehen, dem Nutzen der dadurch gewonnenen Erkenntnisse (mögliche Verbesserungs- und Einsparungspotenziale) gegenübergestellt werden.

### *3. Festlegung der Zielsetzung bzw. Fragestellung*

Liegt eine positive Entscheidung vor, hat als nächster Schritt die Definition der Zielsetzung und Fragestellung, welche durch die Anwendung des Vorgehenskonzepts beantwortet werden soll, zu geschehen. Dabei kann zwischen den zwei Möglichkeiten, ob die Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung im Hinblick auf eine Zielgröße (Variante A) oder hinsichtlich mehrerer ausgewählter Zielgrößen (Variante B) erfolgen soll, differenziert werden.

### *4. Festlegung und Erhebung der erforderlichen Daten*

Auf den dritten Punkt aufbauend hat die Bestimmung der zu ermittelnden Produktionskennzahlen bzw. -daten zu geschehen.

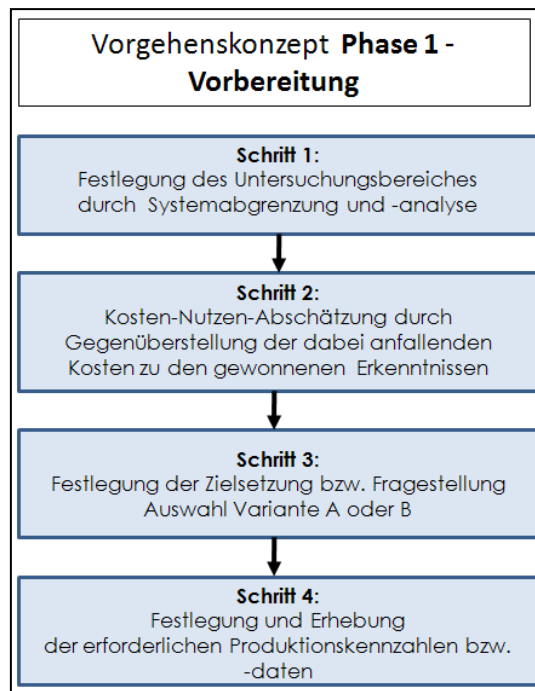


Abbildung 91: Vorgehenskonzept - Phase 1<sup>662</sup>

### **Phase 2 - Abstimmung:**

Nach der Durchführung der Vorbereitungstätigkeiten erfolgt der eigentliche Kernprozess bzw. die Hauptphase des 3-Phasen-Konzepts: die Abstimmung des Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeinflusses auf, je nach gewählter Variante A oder B (Erläuterungen dazu erfolgen detailliert in Abschnitt 4.4.1), eine oder mehrere Zielgrößen des Produktionssystems durch Anwendung eines Verfahrens der mathematischen Programmierung.

### **Phase 3 - Auswertung:**

Nach der erfolgreichen Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen erhält man, je nach gewählter Variante A oder B, eine Aussage bzw. Schlussfolgerung darüber, wie die Produktionslosgröße- oder Reihenfolgeplanung zu geschehen hat, um entweder die Maximierung einer priorisierten Zielgröße zu erhalten oder um eine Verbesserung aller der im betrachteten Produktionssystem relevanten Zielgrößen durchführen zu erzielen.

Im Anschluss daran hat in Phase 3 die Überprüfung bzw. Auswertung (siehe dazu Abbildung 92) der Ergebnisse des Abstimmungsprozesses hinsichtlich Plausibilität, Richtigkeit und Machbarkeit der Umsetzung zu geschehen. Ebenso muss die Bewertung der durch die Umsetzung entstehenden Auswirkungen auf das Produktionssystem (im Speziellen auf die anderen logistischen Zielgrößen) durch das Einsetzen der erhaltenen Losgröße und Reihenfolge in das Bewertungsinstrumentarium zur Berechnung der Einflussfaktoren erfolgen, bevor die Implementierung vorgenommen werden kann.

<sup>662</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

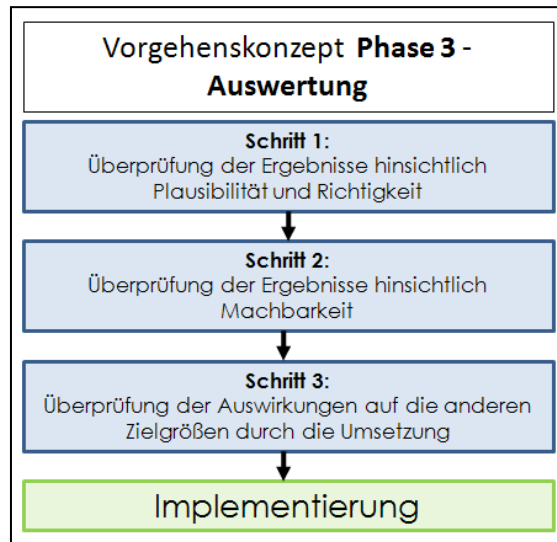


Abbildung 92: Vorgehenskonzept - Phase 3<sup>663</sup>

Nach erfolgreicher Auswertung und Überprüfung der Ergebnisse des Abstimmungsprozesses kann die Implementierung gestartet werden.

#### 4.4.1 Abstimmungsprozess der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen

Wie bereits im Vorhinein erwähnt, stellt die Phase 2 – der Abstimmungsprozess der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen – den Kernprozess des entwickelten 3-Phasen-Konzeptes dar.

Dabei lassen sich zwei Varianten hinsichtlich denen der Abstimmungsprozess vorgenommen werden kann, unterscheiden: Variante A liefert als Ergebnis einen Vorschlag zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung, welche die Maximierung einer zuvor festgelegten Zielgröße verfolgt. Variante B hingegen hat die Ermittlung jener Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl zum Ziel, mit Hilfe derer die Verbesserung mehrerer ausgewählter Zielgrößen realisiert werden kann.

Im Nachfolgenden werden nun die beiden Abstimmungsvarianten im Detail erläutert. Die Entscheidung, ob die Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung hinsichtlich einer oder mehreren Zielgrößen zu geschehen hat, obliegt in der betrieblichen Praxis meist dem mittleren oder obersten Management und richtet sich dabei meist nach den verfolgten Zielen der Produktionsplanung und -steuerung. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass Unternehmen, welche eine hybride Fertigung aufweisen, meist an einer hohen Auslastung aufgrund des vermehrten Einsatzes kapitalintensiver Aggregate interessiert sind.

<sup>663</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

### Variante A - Teilverbesserung einzelner Zielgrößen

Variante A hat wie bereits angeführt die Verbesserung hinsichtlich einer spezifischen Zielgröße zum Inhalt. In der nachfolgenden Abbildung 93 ist die „Logik des Abstimmungsprozesses“ von Variante A erläutert:

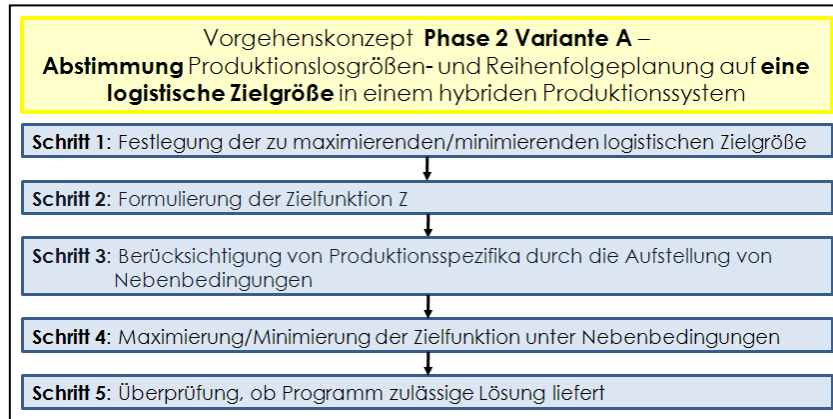


Abbildung 93: Abstimmungsprozess - Variante A<sup>664</sup>

#### Schritt 1: Festlegung der maximierenden bzw. minimierenden logistischen Zielgröße

Zunächst erfolgt die Festlegung jener Zielgröße, welche durch den Abstimmungsprozess (d.h. durch Anwendung des darin enthaltenen Abstimmungsalgorithmus) maximiert oder minimiert werden soll.

#### Schritt 2: Formulierung der Zielfunktion Z

Im nächsten Schritt hat die Formulierung der Zielfunktion zu erfolgen. Die Ableitung und Formulierung der Zielfunktion richtet sich nach der zu maximierenden bzw. minimierenden Zielgröße. Nachstehend angeführt sind die Zielfunktionen für die einzelnen logistischen Größen der Logistikleistung und Logistikkosten eines Produktionssystems. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass beim Abstimmungsprozess in einem hybriden Produktionssystem die Tatsache berücksichtigt werden muss, dass zwischen der Stoffumwandlung und Stoffumformung meist ein Puffer eingesetzt wird, in welchem ein so genannter Pufferbestand gespeichert ist bzw. werden kann. Dies impliziert, dass die Kapitalbindungskosten des Pufferbestandes bei der Formulierung der Zielfunktion Berücksichtigung finden müssen.

#### Termintreue:

Zur Maximierung der Termintreue muss die Terminabweichung, d.h. die Differenz zwischen dem Ist- und Soll-Liefertermin bzw. Fertigstellungstermin eines Auftrages minimiert (siehe dazu Gleichung 86) werden.

$$Z = \min \sum_{i=1}^n |T_{S,i} - T_{I,i}| \quad (\text{Gleichung 86})$$

<sup>664</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

wobei

|           |   |
|-----------|---|
| $Z$       | Zielfunktion                                  |
| $T_{S,i}$ | Soll-Liefertermin eines Auftrags [ZE]         |
| $T_{I,i}$ | Ist-Fertigstellungstermin eines Auftrags [ZE] |
| $n$       | Anzahl der Fertigungsaufträge [-]             |

**Durchlaufzeit:**

Eine Verbesserung der Gesamtdurchlaufzeit eines Produktionssystems kann durch die Minimierung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Durchlaufzeit aller Aufträge in einer definierten Messstrecke  $m$  realisiert (siehe dazu Gleichung 87) werden.

$$Z = \min \sum_{i=1}^n |DLZ_{S,i} - DLZ_{I,i}| \quad \text{(Gleichung 87)}$$

wobei

|             |   |
|-------------|---|
| $Z$         | Zielfunktion  |
| $DLZ_{S,i}$ | Soll-Durchlaufzeit eines Auftrags in Messstrecke $m$ [ZE] |
| $DLZ_{I,i}$ | Ist-Durchlaufzeit eines Auftrags in Messstrecke $m$ [ZE]  |
| $n$         | Anzahl der Fertigungsaufträge [-]                         |

**Produktmix:**

Hinsichtlich des Produktmixes soll die Minimierung der Herstellkosten je Mengeneinheit und Aggregat erreicht werden. Dies kann durch die Verringerung der Anzahl an Umstellungen bzw. Rüstvorgängen realisiert werden, welche u.a. durch die festgelegte Wahl der Produktionslosgröße und -menge je Aggregat bestimmt werden. Daher wird in diesem Fall die Minimierung der Differenz zwischen der Produktionslosgröße und -menge (aller herzustellenden Aufträge, Qualitäten usw.) auf einem Aggregat angestrebt (siehe dazu Gleichung 88).

$$Z = \min \sum_{i=1}^x |m_{Los,i} - m_{p,i}| \quad \text{(Gleichung 88)}$$

wobei

|             |  |
|-------------|--|
| $Z$         | Zielfunktion   |
| $m_{Los,i}$ | Produktionslosgröße je Auftrag bzw. Qualität auf Aggregat $a$ [ME]       |
| $m_{p,i}$   | Produktionsmenge je Auftrag bzw. Qualität auf Aggregat $a$ [ME]          |
| $x$         | Anzahl der herzustellenden Aufträge bzw. Qualitäten auf Aggregat $a$ [-] |

**Auslastung:**

Um eine möglichst hohe Auslastung zu erhalten wird die Minimierung der Leerkosten angestrebt (siehe dazu Gleichung 89).

$$Z = \min \sum_{i=1}^j K_{L,i} \quad (\text{Gleichung 89})$$

wobei

|           |  |
|-----------|--|
| $Z$       | Zielfunktion                           |
| $K_{L,i}$ | Leerkosten je Aggregat [GE]            |
| $j$       | Anzahl der betrachteten Aggregate [ME] |

### **Bestand:**

Die Minimierung des Fertigungsbestands wird durch möglichst geringe Kapitalbindungs- und Lagerhaltungskosten in jeder Produktionsstufe erreicht (siehe Gleichung 90).

$$Z = \min \sum_{i=1}^s (K_{LH,i} + K_{B,i}) \quad (\text{Gleichung 90})$$

wobei

|            |   |
|------------|---|
| $Z$        | Zielfunktion                                |
| $K_{LH,i}$ | Lagerhaltungskosten je Fertigungsstufe [GE] |
| $K_{B,i}$  | Kapitalbindung je Fertigungsstufe [GE]      |
| $s$        | Anzahl der Fertigungsstufen [-]             |

### **Umstellaufwand:**

Die Minimierung des Umstellaufwandes wird durch die Minimierung der Summe aller anfallenden Auftragswechsel(Rüst-)kosten realisiert (siehe dazu Gleichung 91).

$$Z = \min \sum_{i=1}^t K_{A,i} \quad (\text{Gleichung 91})$$

wobei

|           |  |
|-----------|--|
| $Z$       | Zielfunktion                             |
| $K_{A,i}$ | Auftragswechselkosten je Umstellung [GE] |
| $t$       | Anzahl der notwendigen Umstellungen [-]  |

Ergänzend dazu kann auch die Abstimmung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung hinsichtlich der Herstellkosten durchgeführt werden.

### **Herstellkosten:**

Dies wird durch die Minimierung der Summe aller je Auftrag anfallenden Herstellkosten erreicht (siehe dazu Gleichung 92).

$$Z = \min \sum_{i=1}^n HSK_{A,i} \quad (\text{Gleichung 92})$$

wobei

|     |              |
|-----|--------------|
| $Z$ | Zielfunktion |
|-----|--------------|



|             |  |
|-------------|--|
| $HSK_{A,i}$ | Herstellkosten je Auftrag [GE]                               |
| $n$         | Anzahl der produzierten Aufträge in einer Zeitspanne $z$ [-] |

### **Schritt 3: Berücksichtigung der Produktionsspezifika des betrachteten Produktionssystems durch die Aufstellung von Nebenbedingungen**

Im nächsten Schritt hat die Aufstellung der Nebenbedingungen zu erfolgen, in welchen alle im betrachteten System herrschenden Vorschriften, Restriktionen und Wechselwirkungen Berücksichtigung finden.

### **Schritt 4: Maximierung bzw. Minimierung der Zielfunktion unter Nebenbedingungen**

In diesem Schritt erfolgt durch Anwendung eines Verfahrens der mathematischen Programmierung die Ermittlung jener Produktionslosgröße und Reihenfolge, welche die Maximierung oder Minimierung der festgelegten logistischen Zielgröße unter den im Produktionssystem herrschenden Gegebenheiten (berücksichtigt in den aufgestellten Nebenbedingungen) ermöglicht.

### **Schritt 5: Überprüfung, ob Lösung zulässig ist**

Abschließend hat die Überprüfung der erhaltenen Lösung auf ihre Zulässigkeit zu erfolgen, d.h. hier wird sichergestellt, dass der aus der Verbesserung resultierende Losgrößen- und Reihenfolgevorschlag eine zulässige Lösung darstellt.

## **Variante B - Gesamtverbesserung mehrerer Zielgrößen**

Variante B verfolgt die Gesamtverbesserung hinsichtlich mehrerer für das betrachtete Produktionssystem relevanten Zielgrößen durch Anwendung eines Verfahrens der mathematischen Programmierung. Anzumerken dabei ist, dass die Gesamtverbesserung keine lokale Maximierung bzw. Minimierung einzelner Zielgrößen anstrebt, sondern diese so gewählt werden, dass nach jener Lösung gesucht wird, bei der die Gesamtheit aller betrachteten Zielgrößen (global) die besten Werte annehmen (siehe dazu Abbildung 94).

Variante B unterscheidet sich bei der Aufstellung der Zielfunktion dahingehend von der Variante A, dass diese aus einer Kombination mehrerer der oben angeführten Zielfunktionen der einzelnen logistischen Größen besteht. Ansonsten ist die Vorgehensweise des Abstimmungsprozesses analog zu der im Vorhinein erläuterten Variante A zu sehen. Die Umsetzung der Variante B erfolgt im Zuge der Konkretisierung am Fallbeispiel der Gießerei einer Kupferhütte (siehe dazu ausführlich Abschnitt 5.3.3.1.1, S. 226 ff).

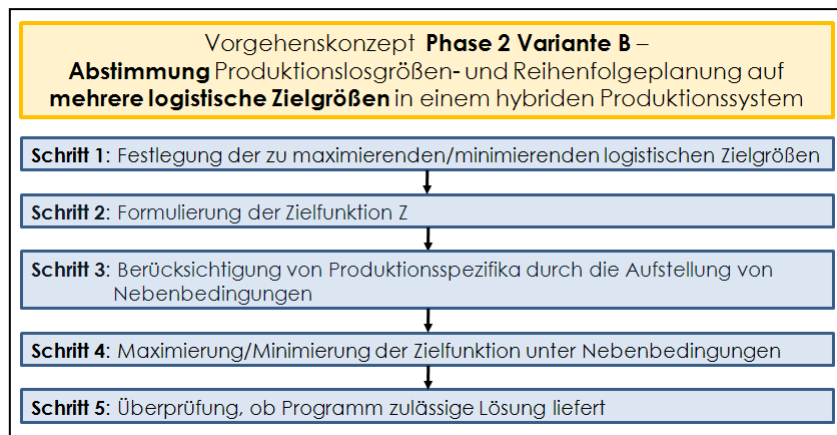


Abbildung 94: Abstimmungsprozess - Variante B<sup>665</sup>

## 4.5 Anwendungsmöglichkeiten und Restriktionen

Im Folgenden werden nun die Anwendungsmöglichkeiten und Restriktionen der entwickelten Modelle und des daraus abgeleiteten Vorgehenskonzepts diskutiert.

### Anwendungsmöglichkeiten

Mit Hilfe des entwickelten Bewertungsinstrumentariums, der Übertragung der Einflussfaktoren in die bestehenden Ansätze der Kennlinientheorie und des abgeleiteten Vorgehenskonzepts kann der Einfluss der gewählten Produktionslosgröße und Reihenfolge im Hinblick auf die logistischen Zielgrößen eines Unternehmens bewertet, abgebildet und positiv beeinflusst werden. Aufgrund dieser Entwicklungen können – nach dem modellbasierten Erkenntnisprozess – Erkenntnisse gewonnen und in der betrieblichen Praxis nutzbar gemacht werden (siehe Abbildung 95).

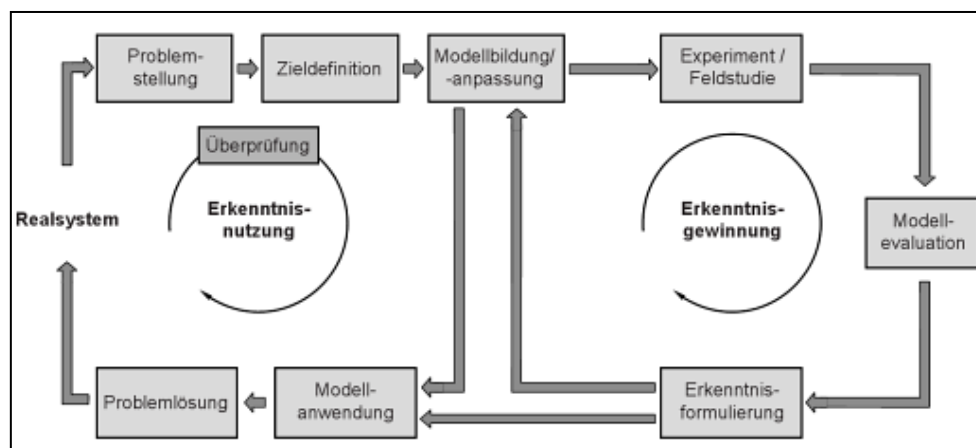


Abbildung 95: Modellbasierter Erkenntnisprozess<sup>666</sup>

Unternehmen gelangen durch Anwendung des Bewertungsinstrumentariums und die Übertragung der dabei ermittelten Faktoren in ein Beschreibungsmodell, einerseits zur Erkenntnis

<sup>665</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>666</sup> Nyhuis (2008), S. 8.

des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf das Leistungsverhalten ihrer Produktion, andererseits wird aber auch aufgezeigt, inwiefern diese Beeinflussung erfolgt und welche Auswirkungen diese mit sich bringt (was durch die Veränderung der Kennlinienverläufe ersichtlich wird). Weiters wird durch die Anwendung des Vorgehenskonzepts dem Benutzer in der betrieblichen Praxis ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, welches diesem Unterstützung hinsichtlich:

- der Entscheidungsfindung bei der Produktionslosgrößen und Reihenfolgefestlegung bietet,
- Benutzern somit als „Wegweiser“ zur Bestimmung der Produktionslosgröße und Reihenfolge dient,
- und die positive Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf ausgewählte logistische Zielgrößen ermöglicht.

### **Restriktionen**

Die Anwendung des Bewertungsinstrumentariums, die Übertragung der Erkenntnisse in die Kennlinientheorie und die Anwendung des Vorgehenskonzepts unterliegen den nachfolgend angeführten Restriktionen.

- Das Bewertungsinstrumentarium liefert nur unter der Voraussetzung, dass die Berechnungsformeln der einzelnen Einflussfaktoren (siehe Abschnitte 4.2.2 und 4.2.3) richtig verwendet werden, aussagekräftige Ergebnisse.
- Die entwickelten Modelle (siehe Abschnitt 4.3) gelten für ein hybrides Produktionssystem und den dabei beschriebenen Situationen und sind den jeweils auftretenden Gegebenheiten anzupassen.
- Zur Erreichung einer positiven Abstimmung der Losgrößen- bzw. Chargengrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen durch Anwendung des Abstimmungsprozesses (siehe Abschnitt 4.4) müssen alle im betrachteten Produktionssystem herrschenden Vorschriften und Abhängigkeiten durch die Aufstellung von Nebenbedingungen Berücksichtigung finden.

## 4.6 Zusammenfassung und Überleitung

Im Unterkapitel 4.6 werden nun nochmals die wesentlichen Inhalte von Kapitel 4 zusammengefasst.

Zunächst wurden auf Basis einer Literaturrecherche und mittels einer Expertenbefragung jene Faktoren ermittelt, welche einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines hybriden Produktionssystems aufweisen. Dabei konnte festgestellt werden, dass das klassische Zielsystem der Pro-

duktionslogistik nach Wiendahl im Hinblick auf ein hybrides Produktionssystem um die Einflussfaktoren des Produktmixes, der Produktionslosgröße, des Umstellaufwandes und der Anlagenverfügbarkeit zu erweitern ist. In einem nächsten Schritt wurden verschiedenste Situationen, welche ein hybrides Produktionssystem in der betrieblichen Praxis aufweisen kann, diskutiert, um so eine Aussage wie die Festlegung der Produktionslosgröße und Reihenfolge in der Praxis geschieht, erhalten zu können. Ebenso erfolgte die graphische Darstellung des Einflusses der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung in hybriden Produktionssystemen. Darauf aufbauend wurde die Ableitung von Bewertungsparametern, anhand derer der Einfluss und die Auswirkungen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl auf die logistischen Zielgrößen eines Produktionssystems im Zuge der Anwendung des entwickelten Bewertungsinstrumentariums bestimmbar sind, vorgenommen. Es wurde gezeigt, dass sich anhand dieses Bewertungsinstrumentariums die Einflüsse der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl auch auf die logistischen Kennlinien übertragen lassen und so verschiedenste Situationen, Wirkungen und Zusammenhänge unter Zuhilfenahme dieses Werkzeuges diskutiert und dargestellt werden können. Im Anschluss daran wurde ein Vorgehenskonzept vorgestellt mit Hilfe dessen die Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgewahl auf eine oder mehrere logistische Zielgrößen durch Anwendung eines Verfahrens der mathematischen Programmierung realisiert werden kann. Den Abschluss von Kapitel 4 bildet die Diskussion der Anwendungsmöglichkeiten und Restriktionen der entwickelten Instrumentarien.

Die entwickelten Modelle werden nun in Kapitel 5 am Beispiel der Gießerei einer Kupferhütte in Form eines Simulationsmodells und mittels VBA-Skripten umgesetzt, um die Verifizierung und Validierung dieser vornehmen zu können.

## 5 Konkretisierung am Beispiel einer Kupferhütte

Die Verifizierung und Validierung der entwickelten Modelle am Fallbeispiel der Gießerei eines Kupferherstellers stellt den Inhalt des fünften Kapitels dar. Zunächst wird die Abgrenzung des untersuchten Unternehmensbereichs vorgenommen. Dabei werden die in der Gießerei herrschende Ist-Situation und die daraus resultierenden Zielsetzungen seitens des Unternehmens vorgestellt. Im Anschluss daran erfolgt in Abschnitt 5.3 die Konkretisierung des Abstimmungsprozesses des 3-Phasen-Konzepts sowie des Bewertungsinstrumentariums durch die Umsetzung dessen in Form eines Simulationsmodells und mittels Visual Basic for Applications (kurz VBA)-Skripten. Im Anschluss daran werden die daraus gewonnenen Erkenntnisse und abgeleiteten Schlussfolgerungen beschrieben. Weitere Inhalte des fünften Kapitels stellen die Wirkungskontrollen der Modelle sowie die Beurteilung der entwickelten Basisfunktion zur Beschreibung logistischer Kennlinien aus Abschnitt 3.3.3.1.1 dar. Die Verifizierung und Validierung erfolgt, wie bereits erwähnt, am Fallbeispiel einer Kupferhütte<sup>667</sup>, welche auf die Wiedergewinnung von Kupfer und anderen Wertmetallen aus Kupferschrotten und sonstigen kupferhaltigen Sekundärmaterialien spezialisiert ist. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Beurteilung der Adaptierbarkeit der entwickelten Modelle auf andere Produktionssysteme.

### 5.1 Abgrenzung und strukturierte Betrachtung des Produktionssystems

In diesem Abschnitt erfolgt auf Basis der in Abschnitt 3.2.2 erläuterten Grundlagen der Systemtheorie die Analyse des Systems Gießerei einer Kupferhütte durch die Abgrenzung des festgelegten Untersuchungsbereichs sowie die Beschreibung der darin auftretenden Systemelemente, Wechselwirkungen und Beziehungen.

Zunächst wird grob der gesamte Produktionsablauf der Kupferherstellung (Endprodukte: Rundbolzen und Walzplatten) auf der Makroebene erläutert, bevor im Anschluss die detaillierte Systembeschreibung der Gießerei auf der Mikroebene erfolgt:

Durch den Einsatz von pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Raffinationsverfahren<sup>668</sup> erfolgt in der Kupferhütte sowohl die Erzeugung von hochreinem Kupfer als auch die Rückgewinnung von wirtschaftlich wichtigen Metallen aus Sekundärrohstoffen. Bei der pyrometallurgischen Raffination werden die Metalle geschmolzen und bei rund 1100 °C über den Schachtofen, den Konverter und den stationären Flammofen (auch Anodenofen genannt)

<sup>667</sup> Unternehmen ist dem Lehrstuhl für Industriellistik bekannt.

<sup>668</sup> Siehe ausführlich zu pyrometallurgische und hydrometallurgische Raffinationsverfahren: Pawlek, F. (1983), S. 105, S. 587, S. 595 ff. und Bergmann (2002), S. 19 ff.

gereinigt. Die Schmelze aus dem Flammofen enthält ca. 99 % Kupfer, welche zu Anodenplatten vergossen wird. Die Anodenplatten bilden das Ausgangsprodukt für die hydrometallurgische Raffination im Zuge derer das Kupfer auf elektrochemischen Wege gereinigt wird. Dieses wird maschinell abgezogen und als Kathodenkupfer (der Kupfergehalt beträgt hierbei 99,99 %) der weiteren Verwendung zugeführt. In der Gießerei erfolgt nach der neuerlichen Aufschmelzung das Abgießen des Reinstkupfers auf vertikalen Stranggussanlagen (in Form von 7 m bzw. 8 m langen Strängen) in verschiedenen Qualitäten und Dimensionen zu Rundbolzen und Walzplatten, welche auf den anschließenden Sägeanlagen nach Kundenwunsch zugeschnitten werden. Die Edelmetalle, welche aus dem Anodenschlamm der Elektrolyse in der Edelmetallanlage gewonnen, sowie die Nickelsulfate, welche in der Nickel-Sulfat-Anlage aus der Trennlauge der Elektrolyse hergestellt werden, stellen neben den Walzplatten und Rundbarren die wesentliche Erzeugnisse der Kupferhütte dar.<sup>669</sup>

In der nachfolgenden Abbildung 96 sind die Materialflüsse des gerade beschriebenen Herstellungsprozesses dargestellt. Ebenso sind die Systemgrenzen des relevanten Untersuchungsbereiches markiert, auf welchen anschließend im Detail eingegangen wird.

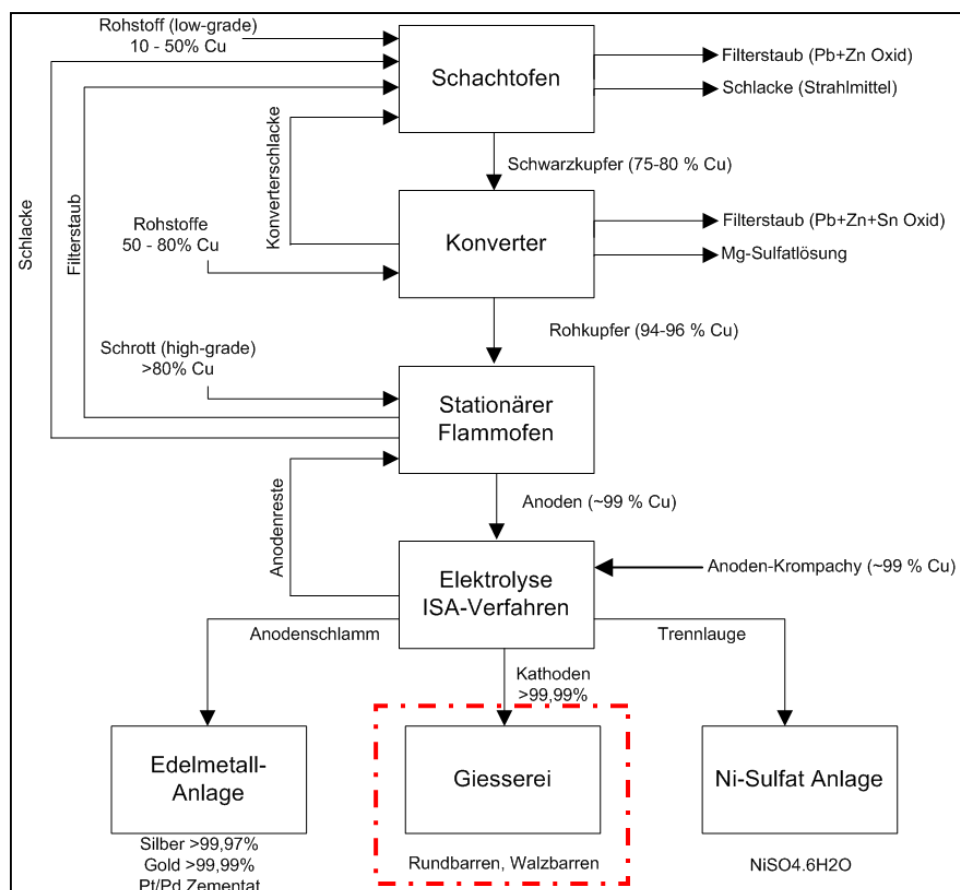


Abbildung 96: Materialfluss - Kupferhütte<sup>670</sup>

<sup>669</sup> Vgl. Kupferhütte (2011a), S. 7 ff.

<sup>670</sup> Quelle: Kupferhütte (2012).

### 5.1.1 Das Subsystem „Gießerei“

Die Nennkapazität der Gießerei liegt bei ca. 100 000 Tonnen pro Jahr, wobei ca. 60 000 Tonnen über den ASARCO-Schachtofen und ca. 40 000 Tonnen über die Elektroöfen produziert werden. Aktuell werden in der Gießerei auf allen Aggregaten ca. 80 000 Tonnen an Walzplatten und Rundbolzen erzeugt.<sup>671</sup>

Zunächst erfolgt die Beschickung des Einsatzgutes durch Schrott und Kathoden (werkseigene BRX-Kathoden und zugekaufte Kathoden) aus der Elektrolyse, welche mittels Aufzug über eine Chargieröffnung in die ASARCO-Schachtofenanlage gelangen, wo bei einer Schmelzleistung von 8 bis 12 Tonnen pro Stunde das geschmolzene Kupfer gewonnen wird. Dieses fließt anschließend kontinuierlich über eine mit automatisch betriebenen Gasbrennern beheizte Rinne aus dem Ofen in zwei nachgeschaltete Gießöfen (Gießöfen 5 und 6) ab, wo in den Gießanlagen 3 und 4 die Standardqualitäten ETP und DHP gegossen werden. Durch die Änderung der Brennerleistung wird das Volumen des herausfließenden Kupfers geregelt bzw. durch das Abschalten der Brenneranlage und Einblasen von Luft kann das Herausfließen in kürzester Zeit unterbrochen werden. Der Schacht ist immer mit Einsatzstoffen befüllt, sodass nach Stillständen innerhalb einer kurzen Anlaufzeit der Betrieb wieder hergestellt werden kann. Der Betrieb der Anlage erfolgt in der Regel in drei Schichten an Wochentagen, zweimal im Jahr sind geplante Stillstände aufgrund von Reinigungs-, Wartungs- und Reparaturarbeiten vorgesehen, was in Summe in 5 800 Betriebsstunden pro Jahr resultiert.<sup>672</sup>

Ebenso befinden sich in der Gießerei vier Elektroschmelzöfen (Öfen RIO 1 bis 4), so genannte Rinneinduktionsöfen, welche eine Füllkapazität von ca. 4,5 Tonnen aufweisen und von oben mittels Kran, Kisten und Zangen mit Reinstkupfer chargiert werden. Diese können, nach der elektronischen Aufschmelzung, in jeweils zwei diskontinuierlich produzierenden Absenkanlagen (Gießanlage 1 und 2) Kupferstränge von acht Metern Länge abgießen. Dabei fließt das geschmolzene Kupfer über abgedeckte Rinnen direkt in die Abgussanlage. Dieser vorgeschaltet ist ein Oszillationstisch, in welchem die wassergekühlte Kokille eingesetzt ist. Dabei werden Stränge zwischen 120 und 500 mm Durchmesser je nach Kundenvorgabe erzeugt. Die Rinneinduktionsöfen werden zur Erzeugung von Spezialqualitäten verwendet.<sup>673</sup>

Im Anschluss werden die Gussstränge am Rollengang(lager) vor der Sägemaschine abgelegt und je nach Kundenwunsch geschnitten, gestapelt (Kurzbolzen), Probescheiben für die Qualitätssicherung entnommen oder mittels Rollengangauslauf direkt aus der Halle transportiert (Langbolzen). In der Regel werden die Bolzen mittels Stapler in das Prüflager transportiert, nur

---

<sup>671</sup> Vgl. Kupferhütte (2011b), S. 20.

<sup>672</sup> Vgl. Kupferhütte (2011b), S. 20.

<sup>673</sup> Vgl. Kupferhütte (2011b), S. 21.

die so genannten „freien Bolzen“, welche keiner Prüfung unterliegen, gelangen direkt ins Versandlager.<sup>674</sup>

In der nachfolgenden Abbildung 97 ist das schematische Fließschema der Gießerei dargestellt, welches die Abgrenzung der Prozesse (siehe Markierungen) der Stoffumwandlung, -umformung und der anschließenden Weiterverarbeitung beinhaltet.

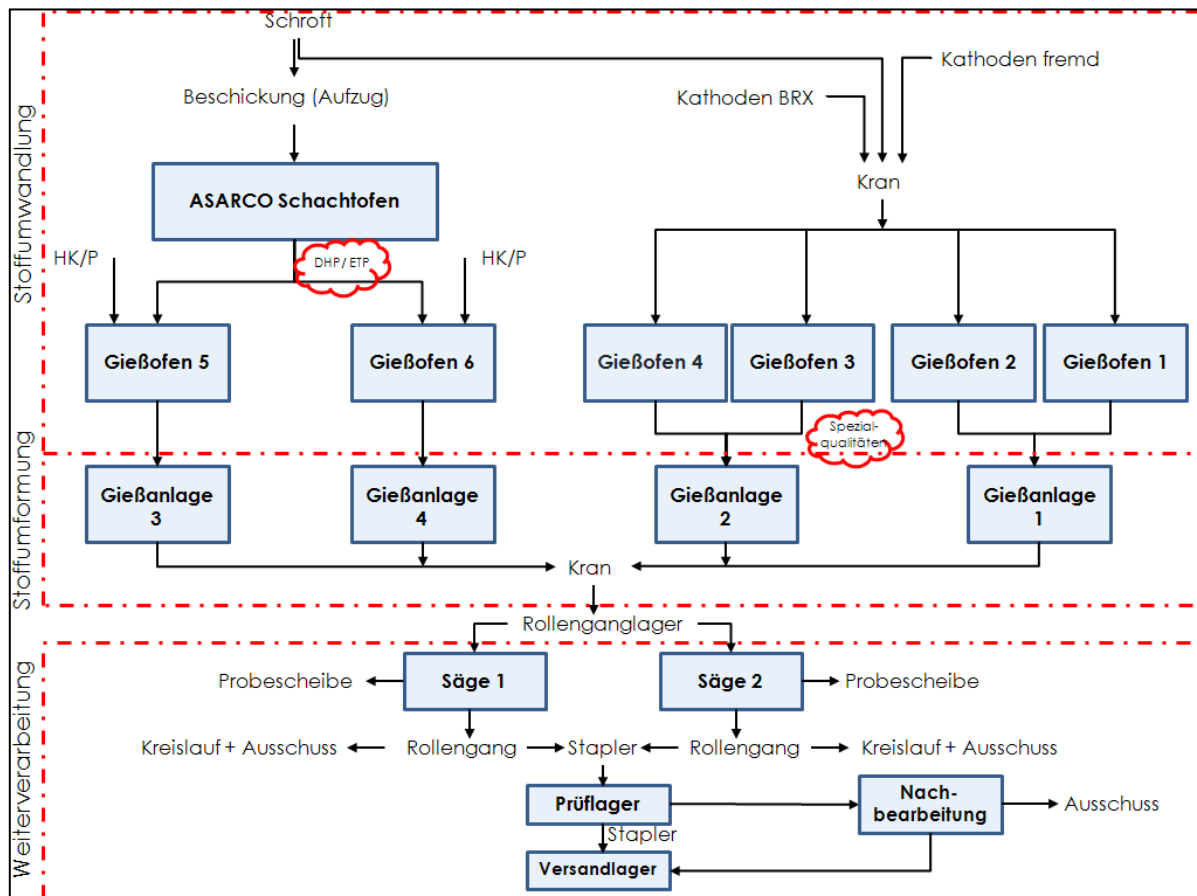


Abbildung 97: Subsystem Gießerei<sup>675</sup>

Wie in Abbildung 97 ersichtlich, handelt es sich beim Subsystem der Gießerei um ein hybrides Produktionssystem, anhand dessen nun die Verifizierung und Validierung der in Kapitel 4 entwickelten Modelle vorgenommen wird.

## 5.2 Analyse der Ausgangssituation und Zielformulierung

Es folgt zunächst die Beschreibung der in der Gießerei herrschenden Ist-Situation, um darauf aufbauend die sich im Zuge der Konkretisierung der in Kapitel 4 entwickelten Modelle ergebenden Zielsetzungen seitens des Unternehmens zu beschreiben.

<sup>674</sup> Vgl. Kupferhütte (2011c).

<sup>675</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.



### 5.2.1 Ausgangssituation

Im Nachfolgenden wird die Ausgangssituation betreffend des Subsystems Gießerei, welche auf Basis von Interviews und Diskussionen mit den dort verantwortlichen Personen<sup>676</sup> und durch Feldbeobachtungen vor Ort ermittelt wurden, erläutert. Fokussiert wird hierbei vor allem der Vorgang der Los- bzw. Chargengrößen- und Reihenfolgeplanung.

Auf Basis der eingehenden Kundenaufträge wird eine Auftragsliste für die Gießerei (auf Monatsbasis) generiert. Die kurzfristige Produktionsprogrammplanung, d.h. die Produktionslosgröße bzw. Chargengröße sowie die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge wird auf Basis dieser Liste in der Regel manuell vom Betriebsleiter oder dem Meister der Gießerei erstellt. Dabei wird versucht möglichst große Lose der gleichen Qualität unter Berücksichtigung der gewünschten Liefertermine zusammenzustellen, um so durch die Bündelung der Kundenaufträge einen möglichst hohen Durchsatz bzw. eine hohe Auslastung des Systems zu erzielen. Weiters hat dabei die Aufeinanderabstimmung der Schmelz- und Gießleistung der Aggregate zu erfolgen. Im Zuge der Produktionsprogrammplanung muss die Tatsache, dass manche Qualitäten einer speziellen Vorbereitung bei den Öfen unterliegen oder nur auf speziellen Anlagen abgegossen werden können und dementsprechende Vorlaufzeiten benötigen bzw. Einschränkungen in der Maschinenbelegung vorherrschen, Berücksichtigung finden.

Momentan wird das Produktionsprogramm manuell, auf Erfahrungswerten beruhend, erstellt. Es wird kein PPS-Programm verwendet, welches eine automatisierte Produktionsprogrammplanung ermöglicht bzw. als Entscheidungsunterstützung herangezogen werden kann. Dadurch ist die Vorgehensweise der Produktionsprogrammerstellung kaum dokumentiert. Das aktuelle Produktionsprogramm der Gießerei weist sehr viele Unterbrechungen im Produktionsablauf, bedingt durch zahlreiche Rüst- und Umstellvorgänge, auf, welche mit Hilfe einer automatisierten Planung minimiert werden könnten. Die Herstellkosten der gesamten Gießerei können zwar über ein PPS-System erfasst werden, jedoch existiert keine genaue Zuordnung dieser zu den verschiedenen Qualitäten und Abmessungen. Weiters sind die in der Produktion herrschenden Einflussfaktoren auf das Leistungsverhalten der Gießerei, wie auch die tatsächlich anfallenden Kosten pro Tonne, kaum bekannt. Die Fertigungs- und Lagerbestände können zwar aus dem im Unternehmen vorhandenen AS400-System abgefragt werden, jedoch tritt des Öfteren der Fall auf, dass nicht ausreichend Einsatzmaterial auf Lager liegt. Die Ermittlung der Auslastung und Herstellkosten erfolgt monatlich. Die Liefertreue wird vom Versand überprüft und gegebenenfalls eingemahnt. Eine Überwachung aller Zielgrößen findet nicht statt, was den Verantwortlichen in der Gießerei als sinnvoll und auch notwendig erscheint.

Auf Basis der hier beschriebenen Ausgangssituation ergeben sich die in 5.2.2 beschriebenen Zielsetzungen für das Subsystem Gießerei.

---

<sup>676</sup> Zusammenfassung der Gesprächsprotokolle der durchgeführten Interviews mit dem Verantwortlichen für die Forschung und Entwicklung sowie des Qualitätsmanagements und dem Betriebsleiter der Gießerei und der Platzbetriebe siehe Anhang E, S. 296 ff.

## 5.2.2 Zielsetzungen

Die größten Verbesserungspotenziale sehen die Verantwortlichen in der Schaffung einer nachvollziehbaren und transparenten Produktionsprogrammplanung. Ein wesentliches Ziel ist die Ermittlung der anfallenden Stückkosten als  $f(\text{Qualität, Durchmesser, Länge, Losgröße})$  sowie die Erhebung und Darstellung der das Leistungsverhalten und die anfallenden Kosten in der Gießerei bestimmenden Faktoren. Ebenso wird die Erhebung der Prüfkosten als notwendig betrachtet. Des Weiteren liegt die Bestrebung in der Erreichung einer der Auftragslage angepassten Auslastung bzw. in einer Abschätzung dieser bei Priorisierung anderer Zielgrößen. Ebenso sollte eine längere Vorlaufzeit (ca. 3 bis 4 Wochen) bei der Produktionsprogrammplanung erreicht werden, um flexibler auf kurzfristige Kundenwünsche reagieren und somit die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens langfristig stärken zu können. Aktuell wird die Termin- bzw. Liefertreue der Gießerei nicht erhoben, diese soll aber, neben den Lagerkosten, zukünftig überwacht werden können. Durch eine schon im Vorhinein an die Auftragslage angepasste Auslastung des Systems soll die zeitverzögerte, kurzfristige Anpassung des Schichtmodells vermieden werden.

Durch die Anwendung der in Kapitel 4 vorgestellten Werkzeuge sollen die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

1. *Wie ändern sich die Herstellkosten der Erzeugnisse in der Gießerei je Tonne als  $f(\text{Qualität, Durchmesser, Länge und Losgröße})$ ?*
2. *Welchen Einfluss hat die gewählte Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen und die Herstellkosten je Qualität und Durchmesser in der Gießerei?*
3. *Wie muss die Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf diese erfolgen, um eine Verbesserung zu erzielen?*
4. *Wie wirkt sich die aufgrund der Fokussierung einer oder mehrerer Zielgrößen beim Abstimmungsprozess erhaltene Losgrößen- und Reihenfolgealternative auf die anderen Zielgrößen in der Gießerei aus?*

Zur Beantwortung dieser Fragen wird die Alternative B des Abstimmungsprozesses des 3-Phasen-Konzepts, die Abstimmung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf ausgewählte Zielgrößen, in diesem Fall mit Fokussierung auf die Durchlaufzeit, Termintreue, Bestände, Auslastung und die Herstellkosten, angewandt.

Zusätzlich erfolgt noch die Erhebung der anfallenden Prüf- und Lagerkosten bei unterschiedlichen Auftragsszenarien.

## 5.3 Implementierung des Vorgehenskonzeptes

Dieser Abschnitt hat die Implementierung des Vorgehenskonzeptes, welches in Form eines Simulationsmodells und mittels VBA-Skripten am Beispiel der Gießerei einer Kupferhütte umgesetzt wird, zum Inhalt. Die Autorin hat sich primär aufgrund der Tatsache, dass durch den Einsatz einer Simulation, die Untersuchung unterschiedlichster Szenarien mit einem geringen Anpassungsaufwand vorgenommen werden kann für diese Form der Umsetzung entschieden. Zunächst wird in Abschnitt 5.3.1 kurz im Allgemeinen auf die Simulationsentwicklung und VBA-Programmierung eingegangen, wobei auch eine Vorstellung der verwendeten Software erfolgt. Darauf aufbauend wird die Struktur und der Aufbau des Simulationsmodells, die Erstellung des Programms zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung sowie die Vorgehensweise zur Ermittlung der logistischen Zielgrößen erläutert. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung der durchgeführten Testläufe. Ebenfalls Inhalt dieses Kapitels ist die Erläuterung der Umsetzung des Abstimmungsprozesses der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die Logistikleistung und -kosten sowie des Bewertungsinstrumentariums. Den Abschluss bilden die „Wirkungskontrolle und -beurteilung“ der entwickelten Tools.

### 5.3.1 Erstellung des Simulationsmodells

Die Erstellung des Simulationsmodells erfolgte unter Verwendung der Simulationssoftware Plant Simulation, welche nun zu Beginn grob erläutert wird.

#### 5.3.1.1 Vorstellung der verwendeten Simulationssoftware

Plant Simulation ist eine Simulationssoftware der Firma Siemens, mit Hilfe derer Produktionssysteme und die darin enthaltenen Elemente, Beziehungen und Wechselwirkungen abgebildet werden können. Einsatz findet dieses Simulationswerkzeug vor allem bei der Darstellung und Bestimmung von Material- und Informationsflüssen. Ziel der Anwendung ist es, neu zu erstellende oder auch bereits bestehende Produktionssysteme entsprechend ihren Anforderungen zu entwickeln oder veränderten Rahmenbedingungen anzupassen.<sup>677</sup>

Die Simulationserstellung mittels Plant Simulation ist durch eine anwendungsorientierte Oberfläche und durch die Verwendung bereits vordefinierter Bausteine wie beispielsweise Ressourcen (Maschinen, Arbeiter etc.), Auftragslisten, Operationsplänen, Steuerregelungen usw. mit angemessenem Aufwand realisierbar. Zusätzlich zu den vom Programm zur Verfügung gestellten Bausteinen, können aber auch eigene Bausteine erstellt und implementiert werden. Durch die direkte Anbindung an Informationssysteme wie

---

<sup>677</sup> Vgl. Siemens Industry Software GmbH & Co. KG. (2011).

beispielsweise SAP, Oracle-, Access-Datenbanken oder Excel-Sheets kann ein einfaches Implementieren von Unternehmensdaten realisiert werden. Weiters ist es möglich, das erstellte Modell in ein dreidimensionales Abbild umzuwandeln, um so eine bessere Visualisierung des abzubildenden Produktionssystems zu erreichen.<sup>678</sup>

Im Allgemeinen steht bei einem Großteil der am Markt erhältlichen Simulationsprogramme nur eine begrenzte Anzahl an verschiedenen Elementen zur Verfügung.<sup>679</sup> Um nun das reale System hinsichtlich seiner Funktionalität ausreichend abbilden zu können, müssen diese Elemente entsprechend zu Objekten verknüpft werden. Als Objekt bezeichnet man die Summe an Eigenschaften, durch welche dieses beschrieben werden kann. Diese Eigenschaften werden als Attribute bezeichnet und bestehen aus einem Attributtyp sowie dem zugehörigen Attributwert. Klassen sind benutzerdefinierte Datentypen, welche nicht durch Standardtypen definiert sind.<sup>680</sup>

In Plant Simulation stehen dabei sechs Standardklassen zur Verfügung:<sup>681</sup>

#### 1. *Materialflussbausteine:*

Es werden aktive und passive Bausteine unterschieden, wobei die aktiven Bausteine die Materialien direkt bewegen (wie beispielsweise Einzelstationen, Parallelstationen, Montage- und Demontagestationen, Förderstrecken etc.), bei passiven Bausteinen (wie beispielsweise Lägern bzw. ein- und zweispurige Wegen) ist dies nicht möglich. Aktive Materialflusselemente geben die beweglichen Elemente automatisch ab, hingegen können diese von passiven Elementen nur unter Zuhilfenahme einer Methode weitergereicht werden.

#### 2. *Ressourcenbausteine:*

Ressourcenbausteine werden zur Simulation von Arbeitern benutzt, welche u.a. bei Reparatur- und Rüstdiensten, Maschinenbedienungen oder zum Transport von Fördergütern von einer Station zur nächsten zum Einsatz kommen.

#### 3. *Allgemeine Bausteine:*

Hierbei handelt es sich um die Bausteine Netzwerk, Kante und Ereignisverwalter. Das Netzwerk, welches kein eigenes Grundverhalten besitzt, stellt die Modellierungsgrundlage eines jeden Modells dar. Kanten verbinden einzelne Bausteine und Netzwerke miteinander, während der Ereignisverwalter die Ereignisse im Laufe der Simulation steuert. Mit Hilfe des Ereignisverwalters „wissen“ die einzelnen Stationen, wann bestimmte

<sup>678</sup> Vgl. Siemens Industry Software GmbH & Co. KG. (2011).

<sup>679</sup> Vgl. Bangsow (2008), S. 21 f.

<sup>680</sup> Vgl. Bangsow (2011), S. 20 ff.

<sup>681</sup> Vgl. Bangsow (2008), S. 25 ff.

Aktionen durchzuführen sind (wie beispielsweise die Weitergabe eines beweglichen Elements). Weiters kann mit Hilfe des Ereignisverwalters die Simulation jederzeit angehalten, gestartet oder die Geschwindigkeit der Simulationsläufe geregelt werden.

#### 4. *Bewegliche Elemente (BE):*

Bewegliche Elemente, so genannte BEs, können erzeugt, bewegt und vernichtet werden und bilden den Materialfluss innerhalb eines Modells ab. Insgesamt gibt es drei verschiedene Arten von BEs: Fördergüter, Förderhilfsmittel und Fahrzeuge. Fördergüter werden durch die Eingabe ihrer Länge und Breite definiert und haben kein eigenes Grundverhalten, sondern werden lediglich von einem Baustein zum nächsten weitergegeben. Förderhilfsmittel (z.B. Paletten), welche ebenfalls kein aktives Grundverhalten aufweisen, können je nach festgelegter Kapazität eine unterschiedliche Anzahl an Fördergüter aufnehmen. Fahrzeuge hingegen bewegen sich aktiv auf konstruierten Wegen und können sowohl hinsichtlich ihrer Größe als auch ihrer Geschwindigkeit definiert werden.

#### 5. *Informationsflussbausteine:*

Hierbei handelt es sich um ein- oder mehrdimensionale Listen und Tabellen, welche die Speicherung von Daten wie beispielsweise Arbeitsplänen, Rüstzeiten, statistischen Informationen oder auch verschiedenste Berechnungen ähnlich wie in Excel-Sheets ermöglichen. Weiters gibt es Zeitleisten, welche Werteverläufe über die Zeit aufnehmen und verwalten, Trigger, mit Hilfe derer Methodenaufrufe sowie Änderungen einzelner Attribute oder globaler Variablen während der Simulation realisiert werden können, Generatoren, die nach bestimmten Mustern Methodenbausteine aktivieren sowie Attribut- und Ereignisverwalter, welche die Verwaltung von Eigenschaften, aber auch der Systemzeit, ermöglichen.

#### 6. *Anzeigenbausteine:*

Diese Bausteine ermöglichen die Erstellung einer Vielzahl von Diagrammen wie beispielsweise Histogrammen oder Sankey-Diagrammen, in welchen Materialflüsse oder zeitliche Werteverläufe von gewünschten Größen dargestellt werden. Weiters können damit Engpassanalysen durchgeführt und die dabei identifizierten Engpässe abgebildet werden. Anzeigebausteine bieten aber auch die Möglichkeit ein Display, einen Bericht (über das gesamte Systemverhalten) oder einen Kommentar anzuzeigen.

Neben diesen Bausteinen gibt es noch die Möglichkeit, mit Hilfe von Dialogbausteinen und -fenstern „direkt mit dem Programm in Kontakt zu treten“, d.h. dem Programm verschiedene variable Parameter zu übergeben oder selbst definierte Operationen auszuwählen. Bei der

Erstellung eines Modells mit Hilfe der vorgegebenen oder selbst erstellten Bausteine können die Eigenschaften und Ereignisse teilweise über die Einstellungen der einzelnen Bausteine vorgegeben und gesteuert werden.<sup>682</sup> Für den Ablauf einer Simulation sind aber meist auch Methoden und Funktionen notwendig. Eine Funktion ist eine Reihe von Anweisungen, welche beim Aufruf derer abgearbeitet werden. Je nach Art der Funktion können ein oder mehrere Parameter übergeben werden bzw. existieren auch Funktionen, welche Rückgabewerte liefern. Methoden lassen sich prinzipiell jederzeit über ihren Namen aufrufen, werden aber meist durch bestimmte Ereignisse ausgelöst. Auch hier bietet Plant Simulation eine Reihe vordefinierter bausteinspezifischer Standardmethoden an, mit Hilfe derer die einzelnen Bausteine gesteuert werden können.<sup>683</sup>

Methoden finden jedoch auch dann Anwendung, wenn die einzelnen Bausteine und die darin vorgefertigten Steuerungen nicht mehr ausreichen, um die Realität abbilden zu können. Mit Hilfe der Informationsflusssprache SimTalk können das Grundverhalten der Bausteine angepasst und eigene Kontrollstrukturen gefertigt werden. Ähnlich zu anderen Programmiersprachen gibt es lokale und globale Variablen, verschiedene Datentypen mit festgelegten Wertebereichen sowie mehrere Möglichkeiten der Schleifenbildung, Fallunterscheidung oder Verzweigung, wodurch unterschiedlichste Problemstellungen behandelt werden können.<sup>684</sup>

Aufgrund der Tatsache, dass dieses Simulationswerkzeug speziell für den Zweck der Simulation, Visualisierung, Analyse und Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen generiert wurde, eignet sich die hier vorgestellte Simulationssoftware für die Planung und Steuerung logistischer Systeme und somit für die Konkretisierung dieser Arbeit und der damit verbundenen Aufgabenstellung am besten.

### 5.3.1.2 Schnittstellen mittels VBA-Skripten

Visual Basic for Applications (VBA) ist eine Skriptsprache, welche zur Steuerung von Microsoft-Office (MS) Programmen entwickelt wurde und daher auch in allen MS-Office Produkten wie Word, Excel, Access, Power Point etc. zur Verfügung steht. Durch die Erstellung von VBA-Skripten mittels Programmierung ist es möglich, benutzerdefinierte Funktionen aufzubauen und somit Prozesse zu automatisieren. Weiters ermöglicht VBA den Zugriff auf Windows-API und anderen Low-Level-Funktionalitäten durch Dynamic-Link Libraries (DLLs). Ebenso kann mittels VBA der Import und Export verschiedener Dateiformate durchgeführt werden.<sup>685</sup> Im vorliegenden Fallbeispiel wurde VBA zur Erstellung von Programmen in Form von Excel-

---

<sup>682</sup> Vgl. Bangsow (2011), S. 401 ff.

<sup>683</sup> Vgl. Bangsow (2011), S. 30 ff.

<sup>684</sup> Vgl. Bangsow (2011), S. 25 ff.

<sup>685</sup> Vgl. Roman (2002), S. 9 ff.

Makros<sup>686</sup> zur Durchführung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung sowie für die Umsetzung des Bewertungsinstrumentariums und des Vorgehenskonzepts verwendet.

### 5.3.1.3 Struktur und Aufbau des Simulationsmodells

In diesem Abschnitt wird die Struktur und der Aufbau des Simulationsmodells der Gießerei sowie die einzelnen VBA-Skripten, mit Hilfe derer das in 4.2.4 vorgestellte Bewertungsinstrumentarium und das entwickelte Vorgehenskonzept aus Abschnitt 4.4 umgesetzt wurden, erläutert. Zunächst erfolgt die Vorstellung der Vorgehensweise zur Ermittlung der logistischen Zielgrößen am Fallbeispiel der Gießerei.

#### 5.3.1.3.1 Vorgehensweise zur Ermittlung der logistischen Zielgrößen

Die Ausgangsbasis bildet die von der Arbeitsvorbereitung bereitgestellte Auftragsliste in Form eines Excel-Sheets, welche die für den kommenden Monat zu produzierenden Kundenaufträge enthält (siehe dazu Schritt 1 in Abbildung 99). Die Auftragsliste (siehe dazu Auszug in Abbildung 98) enthält dabei die zu jedem Auftrag zugehörige Produktidentifikation (Nummer, Bezeichnung und Abmessungen), die Lieferdaten (Lieferposition und -datum), Auftragsmenge und -gewicht sowie den zu beliefernden Kunden (Kundenidentifikationsnummer).

| Produktnr. | Produktbezeichnung         | Abmessung 1 - Breite | Abmessung 2 - Durchmesser | Abmessung 3 - Länge | Liefemr. | Lieferpos. | Lieferdatum (X) | Lieferumfang [Stk.] | Lieferumfang [kg] | Kundennr. |
|------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------|----------|------------|-----------------|---------------------|-------------------|-----------|
| 00133      | RUNDB AG 0 04 O            |                      | 175                       | 650                 | 88450    | 1          | 02.05.2011      | 75                  | 10170             | 1216      |
| 00144      | RUNDB AG 0 1%              |                      | 175                       | 480                 | 88418    | 1          | 02.05.2011      | 53                  | 5596              | 1216      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 203                       | 800                 | 88430    | 1          | 02.05.2011      | 117                 | 25564             | 1898      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 203                       | 800                 | 88431    | 1          | 02.05.2011      | 114                 | 24822             | 1898      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 203                       | 800                 | 88436    | 1          | 02.05.2011      | 113                 | 24658             | 1898      |
| 00101      | RUNDB MB OF 101 CERT.      |                      | 234                       | 550                 | 88450    | 2          | 02.05.2011      | 38                  | 7996              | 1216      |
| 00101      | RUNDB MB OF 101 CERT.      |                      | 234                       | 650                 | 88433    | 1          | 02.05.2011      | 98                  | 24334             | 1216      |
| 00101      | RUNDB MB OF 101 CERT.      |                      | 234                       | 650                 | 88450    | 3          | 02.05.2011      | 20                  | 4990              | 1216      |
| 00101      | RUNDB MB OF 101 CERT.      |                      | 234                       | 650                 | 88454    | 1          | 02.05.2011      | 85                  | 21166             | 1216      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 234                       | 530                 | 88418    | 5          | 02.05.2011      | 19                  | 3778              | 1216      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 254                       | 900                 | 88426    | 1          | 02.05.2011      | 63                  | 24322             | 1898      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 254                       | 900                 | 88427    | 1          | 02.05.2011      | 62                  | 23798             | 1898      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 273                       | 430                 | 88418    | 4          | 02.05.2011      | 33                  | 7424              | 1216      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 273                       | 450                 | 88418    | 3          | 02.05.2011      | 138                 | 32324             | 1216      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 273                       | 650                 | 88418    | 6          | 02.05.2011      | 13                  | 4388              | 1216      |
| 00129      | RB P300-ETP CU DESOXIDIERT |                      | 273                       | 700                 | 88420    | 1          | 02.05.2011      | 70                  | 25606             | 1321      |
| 00129      | RB P300-ETP CU DESOXIDIERT |                      | 273                       | 700                 | 88444    | 1          | 02.05.2011      | 70                  | 25466             | 1321      |
| 00100      | RUNDB MB OFN               |                      | 300                       | 2000                | 88438    | 1          | 02.05.2011      | 19                  | 23834             | 1721      |
| 00101      | RUNDB MB OF 101 CERT.      |                      | 300                       | 800                 | 88418    | 2          | 02.05.2011      | 13                  | 6522              | 1216      |
| 00125      | RUNDB MB-P-300             |                      | 300                       | 825                 | 88415    | 2          | 02.05.2011      | 102                 | 52642             | 1216      |
| 00125      | RUNDB MB-P-300             |                      | 300                       | 825                 | 88416    | 2          | 02.05.2011      | 122                 | 62984             | 1216      |
| 00125      | RUNDB MB-P-300             |                      | 300                       | 825                 | 88417    | 2          | 02.05.2011      | 122                 | 63104             | 1216      |
| 00128      | RUNDB MB-P-300 K           |                      | 300                       | 825                 | 88414    | 1          | 02.05.2011      | 122                 | 62937             | 1216      |
| 00128      | RUNDB MB-P-300 K           |                      | 300                       | 825                 | 88415    | 1          | 02.05.2011      | 20                  | 10320             | 1216      |
| 00128      | RUNDB MB-P-300 K           |                      | 302                       | 783                 | 88421    | 1          | 02.05.2011      | 49                  | 24724             | 1467      |
| 00111      | RUNDB MB OFN (HOLD SOON)   |                      | 150                       | 2150                | 88459    | 1          | 03.05.2011      | 63                  | 21370             | 1828      |
| 00111      | RUNDB MB OFN (HOLD SOON)   |                      | 150                       | 2150                | 88473    | 1          | 03.05.2011      | 63                  | 21310             | 1828      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 203                       | 800                 | 88476    | 1          | 03.05.2011      | 117                 | 25474             | 1898      |
| 00101      | RUNDB MB OF 101 CERT.      |                      | 234                       | 650                 | 88456    | 1          | 03.05.2011      | 19                  | 4720              | 1216      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 234                       | 400                 | 88456    | 3          | 03.05.2011      | 54                  | 8122              | 1216      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 254                       | 900                 | 88458    | 1          | 03.05.2011      | 65                  | 25026             | 1898      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 254                       | 900                 | 88472    | 1          | 03.05.2011      | 63                  | 24296             | 1898      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 254                       | 900                 | 88477    | 1          | 03.05.2011      | 65                  | 24976             | 1898      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 254                       | 900                 | 88480    | 1          | 03.05.2011      | 65                  | 25060             | 1898      |
| 00129      | RB P300-ETP CU DESOXIDIERT |                      | 273                       | 700                 | 88463    | 1          | 03.05.2011      | 70                  | 25526             | 1321      |
| 00129      | RB P300-ETP CU DESOXIDIERT |                      | 273                       | 700                 | 88467    | 1          | 03.05.2011      | 69                  | 25186             | 1321      |
| 00106      | RUNDB MB ETP               |                      | 300                       | 800                 | 88456    | 2          | 03.05.2011      | 20                  | 9912              | 1216      |
| 00125      | RUNDB MB-P-300             |                      | 300                       | 400                 | 88456    | 5          | 03.05.2011      | 16                  | 4036              | 1216      |

Abbildung 98: Auszug Auftragsliste<sup>687</sup>

Diese dient wiederum als Input für das im Nachfolgenden beschriebene VBA-Skript zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung (siehe dazu Schritt 2 in Abbildung 99 und Abschnitt 5.3.1.3.2). Aufgrund der Tatsache, dass durch die benutzerdefinierte Festlegung der Kriterien anhand derer die Produktionsprogrammerstellung erfolgt, die Erstellung flexibler Produktionsprogramme (unter Berücksichtigung der technologischen Herstellungsrestriktionen) ermög-

<sup>686</sup> Siehe ausführlich dazu Roman (2002).

<sup>687</sup> Siehe Kupferhütte (2012).

licht wird, werden die daraus resultierenden unterschiedlichen Losgrößen- und Reihenfolgealternativen wiederum über eine Schnittstelle in das Simulationsmodell implementiert (siehe dazu Schritt 3 in Abbildung 99), wonach je nach festgelegtem Produktionsprogramm unterschiedliche Werte für die einzelnen logistischen Zielgrößen resultieren.

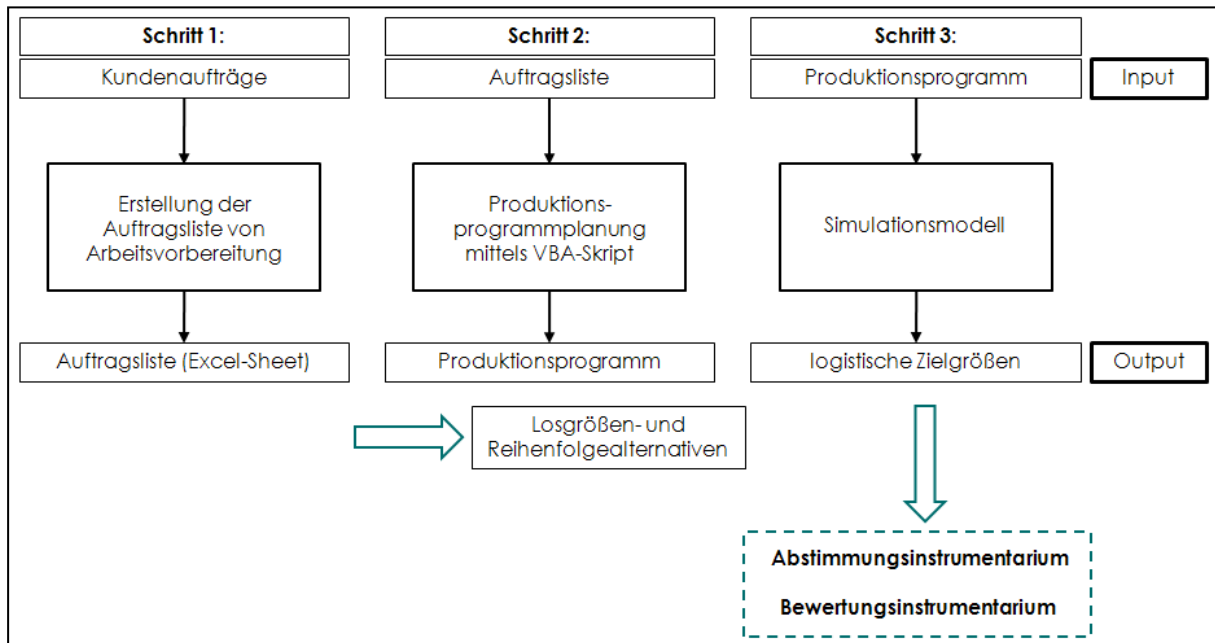


Abbildung 99: Vorgehensweise zur Ermittlung der logistischen Zielgrößen<sup>688</sup>

Die aus dem Simulationsmodell resultierenden Zielgrößen dienen als Input für das entwickelte Bewertungs- und Abstimmungsinstrumentarium, welche zu einem späteren Zeitpunkt in Abschnitt 5.3.3.1.1 und 5.3.3.1.2 erläutert werden.

Bevor nun die Vorstellung des Simulationsmodells erfolgt, wird das Visual Basic (VBA)-Skript, welches die automatisierte Durchführung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung ermöglicht, beschrieben.

### 5.3.1.3.2 VBA-Skript zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

Zunächst wurde, wie bereits erwähnt, ein VBA-Skript geschrieben, welches nach benutzerdefinierten Vorgaben bzw. Kriterien auf Basis einer Auftragsliste (Excel-Sheet), welche die geplanten Aufträge für das Folgemonat enthält und von der Arbeitsvorbereitung am Ende eines Monats bereitgestellt wird, die automatische Durchführung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung ermöglicht. Als Ergebnis erhält man dabei, die aus Basis der durch den Benutzer festgelegten Kriterien resultierende Losgrößen- und Reihenfolgealternative (= Produktionsprogramm). Beim Aufbau des Skripts wurden die folgenden Zielsetzungen fokussiert: Dieses soll die benutzerfreundliche Handhabung durch wenige Benutzereingaben sowie einen hohen Automatisierungsgrad sicherstellen. Weiters soll das VBA-Skript einen selbsterklärenden Auf-

<sup>688</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.



bau aufweisen und durch die Möglichkeit der Eingabe unterschiedlichster Kriterien, nach denen die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung erfolgen kann, die Erstellung flexibler Produktionsprogramme realisieren. In Abbildung 100 sind die im VBA-Skript enthaltenen Objekte dargestellt: Dabei handelt es sich um die Formulare „INFO“ und „START“, welche die graphische Benutzerschnittstelle (Graphic User Interface) darstellen und die Eingabe der Daten durch den Benutzer sowie die Überprüfung bzw. Verarbeitung durch Anwendung von ereignisgesteuerten Codes hinsichtlich verschiedenster Kriterien ermöglichen. Das Formular „INFO“ dient zur Darstellung diverser Informationen zum Excel-Makro und das Formular „START“ ermöglicht die Steuerung des Excel-Makros auf Basis der Benutzereingabe. Des Weiteren enthält das VBA-Skript die Module ARBEITSPLAN, SIMULATION und DURCHLAUFZEIT, welche die Auflistung der Applikationsdeklarationen und -prozeduren (siehe dazu Anhang 1<sup>689</sup>) enthalten.<sup>690</sup> Der große Nutzen dieses VBA-Skripts zur automatisierten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung liegt in der Schaffung einer nachvollziehbaren, transparenten und flexiblen Produktionsprogrammplanung, welches sich jederzeit an veränderte Rahmenbedingungen anpassen lässt und einen für verschiedenste Situationen gültigen Losgrößen- und Reihenfolgevorschlag liefert.

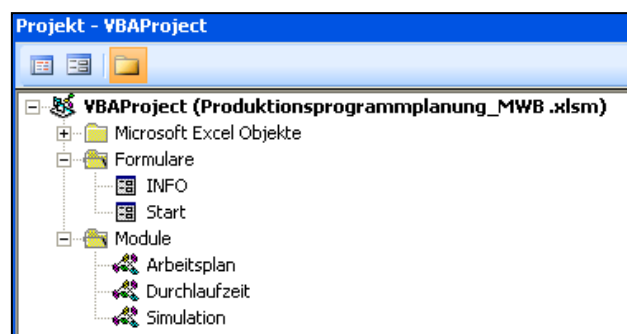


Abbildung 100: enthaltene Formulare und Module im VBA-Skript<sup>691</sup>

In Abbildung 102 ist die Maske bzw. Benutzeroberfläche des VBA-Skripts zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bzw. Produktionsprogrammplanung dargestellt, deren Inhalte nun erläutert werden:

Das Betätigen des Buttons „START“ führt zum Start des Programms zur Durchführung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung (1. in Abbildung 102). Durch die Eingabe des Durchmesserbereichs bzw. der Begrenzung des minimalen und maximalen Durchmessers der Erzeugnisse auf der Gießanlage 3 (mit Gießofen 5) sowie des maximal zulässigen Durchmessers der herzustellenden Produkte auf der Gießanlage 4 (mit Gießofen 6; 3-strängig) in der Benutzermaske, erfolgt die Festlegung der Kriterien zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für diese beiden Aggregate (2. in Abbildung 102). Ebenso kann hierbei durch die Eingabe des minimalen zulässigen Gewichts der Chargen in Tonnen (2. in Abbildung 102), bei Überschreitung dessen,

<sup>689</sup> Programmiercode siehe Anhang 1 auf der beigelegten CD.

<sup>690</sup> Vgl. Roman (2002), S. 9 ff.

<sup>691</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

zur Erreichung einer gleichmäßigeren Auslastung bzw. Auftragsverteilung der bzw. auf die Gießaggregate, ein Ofenwechsel (zwischen Gießofen 5 und 6) erfolgen soll, veranlasst werden. Weiters ist hierbei auch die zu erzeugende Gießstranglänge in mm anzugeben. Die Kriterien für die Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung auf den Rinneinduktionsöfen (RIO) 1 bis 4 erfolgt durch die Angabe des minimal und maximal zulässigen Durchmessers der herzustellenden Produkte, der Angabe der maximalen Differenz zwischen den verschiedenen Erzeugnissen sowie der Eingabe der Gießstranglänge, welche zu produzieren sind (3. in Abbildung 102). So gilt, dass Rundbolzen mit einem Durchmesser von 115 bis 150 mm, mit einer maximalen Durchmesserdifferenz von 35 mm auf einem Aggregat hergestellt werden können bzw. eine Bündelung dieser Aufträge möglich ist. Zu allen weiteren Durchmesserkriterien siehe analog Tabelle 15 auf Seite 219. Ebenso kann hierbei direkt die Zuordnung der Qualitäten auf einen oder mehrere Rinneinduktionsöfen (4. in Abbildung 102), sowie die manuelle Eingabe der Strang, Fuß- und Kopflängen der Bolzen (5. in Abbildung 102) vorgenommen werden. Bei der Zuordnung der Qualitäten auf die Rinneinduktionsöfen sind unbedingt die in (6. in Abbildung 102) angegebenen Restriktionen zu beachten, ansonsten erhält man die Fehlermeldung „Unzulässige Ofenzuweisung! (siehe dazu Abbildung 101). Dabei handelt es sich um die Restriktionen, dass die Qualität „AG“ auf einem anderen Rinneinduktionsofen produziert werden muss als die Qualität „OF101“. Ebenfalls darf in diesem Monat auf jenem Rinneinduktionsofen auf welchem die Qualität „OF101“ produziert wird, nicht die Qualität „P-40“ hergestellt werden. In 7. (in Abbildung 102) ist eine Kurzbeschreibung der notwendigen Schritte zur Ausführung des Makros angegeben. Durch Betätigen des Buttons „EDIT MODE“ gelangt man in den durch Passworteingabe geschützten Programmierbereich (8. in Abbildung 102).



Abbildung 101: Fehlermeldung aufgrund unzulässiger Ofenzuordnung<sup>692</sup>

---

<sup>692</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Produktionsprogrammplanung\_MWB - Microsoft Excel

**START** 1.

**WERTE:**

**GIESS**

|  |     |      |    |                                       |     |    |
|--|-----|------|----|---------------------------------------|-----|----|
| Durchmesserbereich auf Gießbofen_5       | von | 150  | mm | bis                                   | 368 | mm |
| Durchmesser auf Gießbofen_6 (3-strängig) | bis | 273  | mm | (bei größerem Durchmesser 2-strängig) |     |    |
| minimales Gewicht für Ofenwechsel        |     | 200  | t  |                                       |     |    |
| Stranglänge                              |     | 8000 | mm | 2.                                    |     |    |

**RIO**

|             |      |     |                |     |    |
|-------------|------|-----|----------------|-----|----|
| Ø Differenz | 115  | 150 | max. Differenz | 35  | mm |
| Ø Differenz | 175  | 250 | max. Differenz | 75  | mm |
| Ø Differenz | 200  | 300 | max. Differenz | 100 | mm |
| Stranglänge | 7000 | mm  | 3.             |     |    |

**Qualität**

| Qualität | RIO | RIO | RIO | RIO |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| AG       | 1   |     |     |     |
| OFN      | 1   | 2   | 3   | 4   |
| OF 100   | 1   | 2   | 3   | 4   |
| OF 101   | 3   |     |     |     |
| ETP      | 1   | 2   | 3   | 4   |
| P-20     | 1   | 2   | 3   | 4   |
| P-40     | 1   | 2   | 4   |     |
| Sonstige | 1   | 2   | 3   | 4   |


4.

**SÄGE 1-2** 5.

| Qualität                       | L_Strang [mm] | L_Fuß [mm] | L_Kopf [mm] | Aggregate  |
|--------------------------------|---------------|------------|-------------|--|
| P-100; P-500                   | 8000          | 650        | 150         | Gießbofen_5_Gießanlage_3<br>Gießbofen_6_Gießanlage_4 |
| P 300/P 300-K                  | 8000          | 650        | 150         |  |
| ETP                            | 8000          | 650        | 150         |  |
| ETP                            | 7000          | 650        | 150         | RIO_1_2_GA_1<br>RIO_3_4_GA_2                         |
| OFN                            | 7000          | 650        | 150         |  |
| OF 100                         | 7000          | 850        | 150         |  |
| OF 101                         | 7000          | 1250       | 150         |  |
| Spezial (Ag +P/+O, P-20; P-40) | 7000          | 650        | 150         |  |

Bitte geben Sie **mindestens 2 verschiedene Rinneinduktionsöfen** an!  
Weisen Sie **jeder Qualität mindestens einen Rinneinduktionsofen** zu!  
Beachten Sie, dass die **Qualitäten AG und OF101 nie** auf dem **selben Rinneinduktionsofen produziert werden dürfen!**  
Ebenso darf die **Qualität P-40 nicht** auf dem **selben Rinneinduktionsofen produziert werden wie die Qualität OF101!**

6.

Copyright:  Montanuniversität Leoben, 2012.

8. EDIT MODE

**ANLEITUNG:**

|                  |   |
|------------------|---|
| <b>Schritt 1</b> | Geben Sie die gewünschten Parameter (Werte) ein und weisen Sie den Qualitäten Rinneinduktionsöfen zu. Beachten Sie die oben angeführten Restriktionen, sonst erscheint die Fehlermeldung "Unzulässige Ofenzuweisung". |
| <b>Schritt 2</b> | Klicken Sie auf "START" um das Hauptformular zu öffnen.   |
| <b>Schritt 3</b> | Wählen Sie im Hauptformular das gewünschte Monat an.  |
| <b>Schritt 4</b> | Klicken Sie anschließend auf "Plan erstellen" um die Produktionsprogrammplanung zu starten.   |
| <b>Schritt 5</b> | Wählen Sie im so eben geöffneten Fenster die Excel-Datei mit den Aufträgen (Auftragsliste) aus und klicken Sie anschließend auf "Öffnen".   |
| <b>Schritt 6</b> | Das Produktionsprogramm befindet sich bereits in geordneter Reihenfolge in den Tabellenblättern: "RIO1", "RIO2", "RIO3", "RIO4", "GISS_5", "GISS_6".  |
| <b>Schritt 7</b> | Mit dem Button "Zurücksetzen" kann das erstellte Produktionsprogramm wieder gelöscht und anschließend neu erstellt werden.  |
| <b>Schritt 8</b> | Mit dem Button "Speichern und Schließen" wird das erstellte Produktionsprogramm gespeichert und geschlossen.  |

7.

Abbildung 102: Benutzeroberfläche VBA-Skript Losgrößen- und Reihenfolgeplanung<sup>693</sup>

<sup>693</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Tabelle 15: Durchmesser Kriterien für Rinneinduktionsöfen 1-4<sup>694</sup>

| <b>Kriterium Durchmesser</b>  |                         |                         |                              |
|---|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| <b>zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für Rinneinduktionsöfen 1 bis 4:</b> |                         |                         |                              |
| <i>Kriterium</i>  | <i>minimaler Ø [mm]</i> | <i>maximaler Ø [mm]</i> | <i>max. Ø-Differenz [mm]</i> |
| 1   | 115                     | 150                     | 35                           |
| 2   | 175                     | 250                     | 75                           |
| 3   | 200                     | 300                     | 100                          |

Nachdem die Eingabe der Kriterien erfolgt ist, wird durch den Befehl „START“ (1. in Abbildung 102) das Hauptformular des Excel-Makros geöffnet (siehe Abbildung 103), welches im Nachfolgenden erläutert wird.

Abbildung 103: Hauptformular Start des Excel-Makros<sup>695</sup>

Das Hauptformular, verfügt über die Felder „Monat“, „Plan erstellen“, „Zurücksetzen“, „Speichern & Schließen“, „INFO“, „Input Daten“, „Importdatei erstellen“ und „Öffne Simulation“: Im Feld „Monat“ muss jenes Monat ausgewählt werden, für welches die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung zu erfolgen hat. Durch das Aktivieren des Feldes „Plan erstellen“ wird die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für den ausgewählten Monat für die Gießerei durchgeführt.

<sup>694</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>695</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Als Ergebnis erhält man für jedes Aggregat (Rinneinduktionsöfen 1 bis 4, für die Gießofen\_5\_Gießanlage\_3 und Gießofen\_6\_Gießanlage\_4 sowie den Sägen 1 und 2) das erstellte Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeprogramm in Tabellenform (siehe dazu Ausschnitt für Gießofen\_5\_Gießanlage\_3 (rote Markierung) in Abbildung 104).

| Prodtyp | Produktnr. | Produktbezeichnung | Abmessung 1 - Breite | Abmessung 2 - Durchmesser | Abmessung 3 - Länge | Liefernr. | Lieferpos. | Lieferdatum | Lieferumfang [Stk.] | Lieferumfang [kg] | Kundenr. | Aggregat | INFO | INFO |
|---------|------------|--------------------|----------------------|---------------------------|---------------------|-----------|------------|-------------|---------------------|-------------------|----------|----------|------|------|
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 203                       | 400                 | 85525     | 1          | 19.01.2011  | 176                 | 20008             | 2115     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 203                       | 800                 | 85196     | 1          | 05.01.2011  | 243                 | 53454             | 1898     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 203                       | 800                 | 85546     | 1          | 19.01.2011  | 108                 | 23704             | 1898     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 203                       | 800                 | 85647     | 1          | 24.01.2011  | 94                  | 21072             | 1898     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 203                       | 800                 | 85715     | 2          | 26.01.2011  | 41                  | 8958              | 1898     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 203                       | 800                 | 85757     | 1          | 27.01.2011  | 108                 | 23808             | 1898     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 203                       | 800                 | 85806     | 1          | 31.01.2011  | 113                 | 24884             | 1898     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 203                       | 800                 | 85715     | 1          | 26.01.2011  | 68                  | 15000             | 1898     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 203                       | 1600                | 85382     | 1          | 13.01.2011  | 56                  | 24760             | 1898     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 203                       | 1600                | 85519     | 1          | 19.01.2011  | 53                  | 23248             | 1898     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 234                       | 350                 | 85357     | 5          | 13.01.2011  | 7                   | 918               | 1216     | 5        | ETP  | ETP  |
| 3       | 00106      | RUNDB.MB ETP       |                      | 234                       | 380                 | 85597     | 1          | 21.01.2011  | 8                   | 1166              | 1216     | 5        | ETP  | ETP  |

Abbildung 104: Auszug erstelltes Produktionsprogramm je Aggregat<sup>696</sup>

Das Feld „Zurücksetzen“ ermöglicht das Wiederherstellen des Ausgangsmakros zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung und mittels „Speichern und Schließen“ wird das ermittelte Produktionsprogramm in Excel gespeichert und anschließend geschlossen. Das Feld „INFO“ öffnet das Formular „INFO“. Mit dem Ausführen des Feldes „Input Daten“ wird das Excel-Makro „Input\_Gießerei\_MWB“<sup>697 698</sup> geöffnet, in welchem alle Inputdaten (Einsatzmengen, Verfügbarkeiten der einzelnen Aggregate, Rüstzeiten, Kostensätze sowie der prozentuelle Anteil an Ausschuss und Nacharbeit der Aufträge pro Monat) anzugeben sind (siehe dazu Abbildung 105).

Bitte geben Sie nachfolgend den prozentuellen Anteil am Gesamteinsatz in [%] des jeweiligen Einsatzstoffes pro Monat für den **ASARCO-Schachtofen** ein!

Gesamtinput [kg] - ASARCO  kg

**Einsatzstoffe in [%] vom Gesamteinsatz**

|                |        |
|----------------|--------|
| BRX_Kathoden   | 40.00% |
| P_Schrott      | 20.00% |
| E_Schrott      | 20.00% |
| Ag_Schrott     | 0.01%  |
| Kathoden_fremd | 10.00% |
| Lackdraht      | 5.00%  |
| Kreislauf      | 5.00%  |

---

Bitte geben Sie nachfolgend den Gesamteinsatz in kg pro Monat für den **RIO 1-4** ein!

Bitte geben Sie nachfolgende den prozentuellen Anteil am Gesamteinsatz in [%] des jeweiligen Einsatzstoffes pro Monat für den **RIO 1-4** ein!

Gesamtinput [kg] - RIO 1  kg      Gesamtinput [kg] - RIO 2  kg      Gesamtinput [kg] - RIO 3  kg      Gesamtinput [kg] - RIO 4  kg

**Einsatzstoffe in [%] vom Gesamteinsatz**

|                |        |
|----------------|--------|
| BRX_Kathoden   | 40.00% |
| P_Schrott      | 0.01%  |
| E_Schrott      | 10.00% |
| Ag_Schrott     | 0.01%  |
| Kathoden_fremd | 40.00% |
| Lackdraht      | 0.01%  |
| Kreislauf      | 10.00% |

|                |       |
|----------------|-------|
| BRX_Kathoden   | 0.01% |
| P_Schrott      | 0.01% |
| E_Schrott      | 0.01% |
| Ag_Schrott     | 0.01% |
| Kathoden_fremd | 0.01% |
| Lackdraht      | 0.01% |
| Kreislauf      | 0.01% |

|                |        |
|----------------|--------|
| BRX_Kathoden   | 80.00% |
| P_Schrott      | 0.01%  |
| E_Schrott      | 10.00% |
| Ag_Schrott     | 0.01%  |
| Kathoden_fremd | 0.01%  |
| Lackdraht      | 0.01%  |
| Kreislauf      | 10.00% |

|                |        |
|----------------|--------|
| BRX_Kathoden   | 40.00% |
| P_Schrott      | 10.00% |
| E_Schrott      | 0.01%  |
| Ag_Schrott     | 40.00% |
| Kathoden_fremd | 0.01%  |
| Lackdraht      | 0.01%  |
| Kreislauf      | 10.00% |

Anteil **Nacharbeit** in [%] der Aufträge pro Monat:  %      **Rüstzeit** [min]:  min

Anteil **Ausschuss** in [%] der Aufträge pro Monat:  %

Abbildung 105: Auszug Excel-Makro „Input\_Gießerei\_MWB“<sup>699</sup>

Das Feld „Importdatei erstellen“ generiert anschließend die Inputdatei für die Simulation, wobei hier zusätzlich alle für die Simulation notwendigen Berechnungen – die Ermittlung der Gießleistungen je Durchmesser, die Anzahl der herzustellenden Stränge sowie die Schnittan-

<sup>696</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>697</sup> Siehe ausführlich dazu Anhang 2 auf der beigelegten CD.

<sup>698</sup> Siehe ausführlich dazu Excel-Makro Input\_Gießerei\_MWB auf der beigelegten CD.

<sup>699</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

zahl der Sägen, die Anzahl an herzustellenden Bolzen und der Probescheiben – erfolgt. Mit dem Feld „Öffne Simulation“ wird das Simulationsmodell geöffnet.

### 5.3.1.3.3 Simulationsmodell Gießerei

Im nachfolgenden Abschnitt wird das erstellte Simulationsmodell der Gießerei kurz erläutert (für eine ausführliche Bedienungsanleitung zur Handhabung dessen siehe Bedienungsanleitung Simulationsmodell Gießerei).<sup>700 701</sup>

Zunächst muss die Methode „ZURÜCKSETZEN“ ausgeführt werden, welche sicherstellt, dass etwaige vorhandene Daten aus bereits durchgeführten Simulationen gelöscht werden (siehe dazu Abbildung 106, 1.). Im Anschluss können durch die Methode „IMPORT\_Daten“ die notwendigen Inputdaten (siehe Abschnitt 5.3.1.3.2) in das Simulationsmodell geladen werden (siehe Abbildung 106, 2.). Durch Betätigen des Simulationsstarts wird die Simulation gestartet. Sind alle Aufträge, welche es laut Produktionsprogramm herzustellen gilt, abgearbeitet, wird die Simulation automatisch beendet und durch das Ausführen der Methode „EXPORT\_Daten“ (siehe dazu Abbildung 106, 3.) werden die Berechnungen der Outputdaten (siehe dazu Abschnitt 5.3.4) vorgenommen, um diese anschließend in das Excel-File „Output\_Gießerei\_MWB“ zu übertragen.

---

<sup>700</sup> Siehe dazu Bedienungsanleitung Simulationsmodell Gießerei auf der beigelegten CD.

<sup>701</sup> Siehe dazu spp - File Detailmodell\_Giesserei\_MWB auf der beigelegten CD.

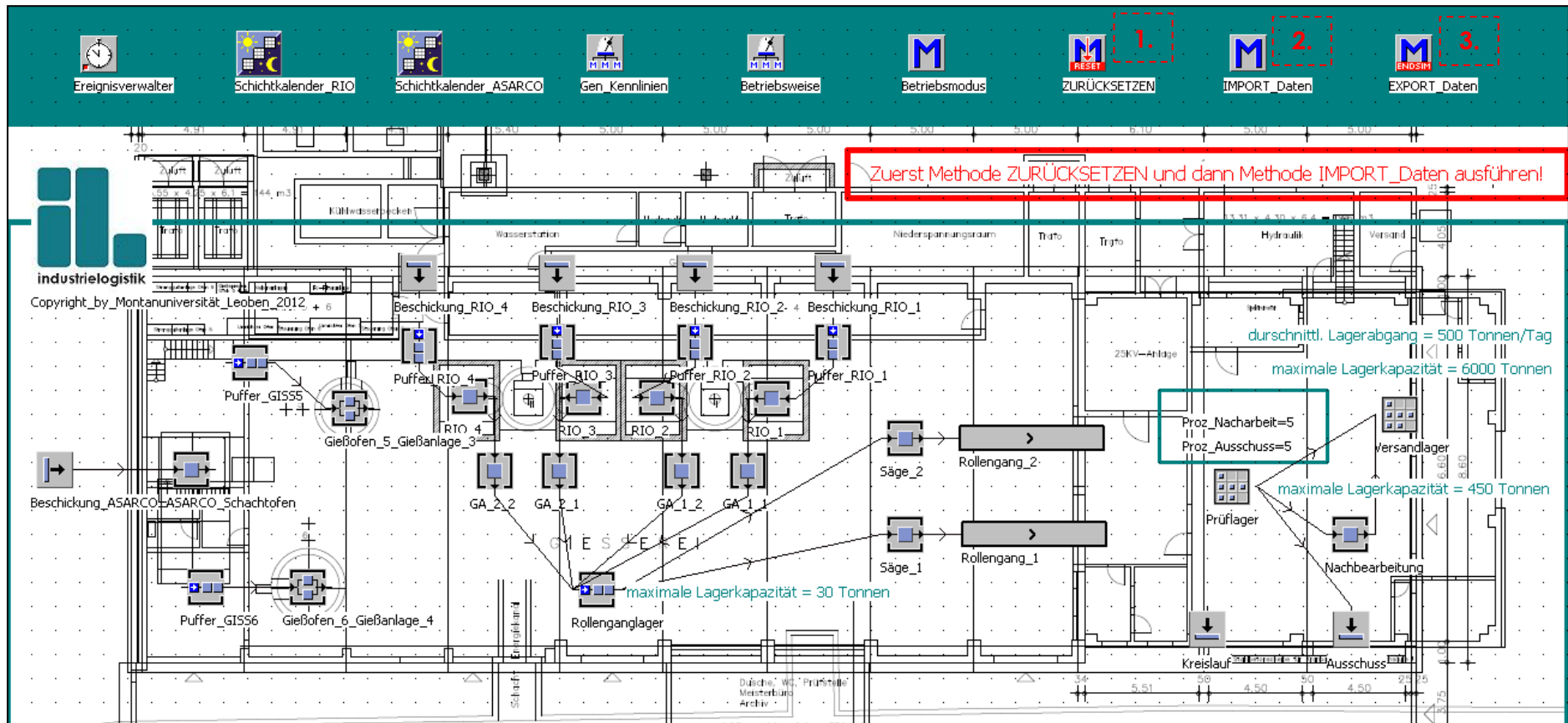


Abbildung 106: Simulationsmodell der Gießerei<sup>702</sup>

<sup>702</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

### 5.3.2 Testläufe

In diesem Unterkapitel erfolgt die Beschreibung der betrachteten Simulationsszenarien. Zum einen wurden Testläufe mit dem ursprünglichen Produktionsprogramm, welches seitens des Unternehmens vorgegeben wurde, durchgeführt, um die im Unternehmen herrschende Ausgangssituation abbilden zu können. Zum anderen wurden Testläufe mit den durch die Anwendung des im 3-Phasen-Konzept enthaltenen Abstimmungsalgorithmus resultierenden Losgrößen- und Reihenfolgealternativen vorgenommen, um so die jeweils dabei erreichten Logistikleistungen (mit den anfallenden Logistikkosten) vergleichen und die dadurch erzielten Verbesserungen aufzeigen zu können.

Dabei wurden die zwei am häufigsten in der Praxis auftretenden Szenarien untersucht:

Szenario 1: „Vollbetrieb“ (7-Tages-Betrieb zu je 3 Schichten) der Gießerei (auf Datenbasis *Auftragsliste März 2011*)

Im ersten Simulationsszenario wird die Vollausslastung der Gießerei der Kupferhütte dargestellt. Hierbei erfolgt die durchgehende Produktion an 26 Tagen zu je 3 Schichten. Daran anschließend müssen Service- und Wartungsarbeiten (bei Warmhaltebetrieb der Öfen) vorgenommen werden, welche insgesamt zwei Schichten zu je 8 Stunden dauern, um im Anschluss wieder weiterproduzieren zu können.

Das Szenario 1 wurde zum einen mit der vom Unternehmen durchgeführten Losgrößen- und Reihenfolgeplanung (Fall: 1a) und zum anderen mit der aus dem Abstimmungsalgorithmus resultierenden Losgrößen- und Reihenfolgealternative (Fall: 1b) getestet.

Szenario 2: „Normalbetrieb“ (5-Tages-Betrieb zu je 3 Schichten) der Gießerei (auf Datenbasis *Auftragsliste Oktober 2011*)

Im zweiten Betrachtungsfall wird der „Normalbetrieb“ der Gießerei simuliert. Dabei erfolgt die Produktion an fünf Tagen der Woche (von Sonntag 20:00 Uhr bis Freitag 12:00 Uhr). In der Zwischenzeit müssen Service-, Reinigungs- und Wartungsarbeiten vorgenommen werden (Öfen im Warmhaltebetrieb), welche von Freitag 12:00 Uhr (bei ASARCO sowie Gießöfen 5 und 6) bzw. von Freitag 16:00 Uhr (bei RIO 1-4) bis Sonntag 12:00 Uhr andauern. Im Anschluss daran erfolgt von Sonntag 12:00 bis 20:00 Uhr der Anfahrbetrieb bzw. das Hochheizen aller Öfen. Auch das Szenario 2 wurde mit der vom Unternehmen bis dato durchgeführten Losgrößen- und Reihenfolgeplanung (Fall: 2a) sowie mit der aus dem Abstimmungsalgorithmus resultierenden Losgrößen- und Reihenfolgealternative (Fall: 2b) simuliert.

Ob in der Praxis die Gießerei im „Voll- oder Normalbetrieb“ betrieben wird, ist von den eingehenden Kundenaufträgen abhängig.

Die aus den Testläufen resultierenden Ergebnisse der betrachteten Fälle (1a - 2b) werden in Abschnitt 5.3.4 erläutert.



### 5.3.3 Umsetzung der Abstimmung und Bewertung

Dieser Abschnitt hat die Umsetzung des „Abstimmungs- und Bewertungsschrittes“ der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die Logistikleistung und -kosten der Gießerei zum Inhalt. Wie in Abbildung 107 ersichtlich, kann durch die Anwendung des 3-Phasen-Konzepts bzw. des darin enthaltenen Abstimmungsprozesses, in *Schritt 1*, die Durchführung der Abstimmung zwischen der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung und den logistischen Zielgrößen und Kosten in einem hybriden Produktionssystem vorgenommen werden. Dies erfolgt aufbauend auf einem bestehenden Produktionsprogramm, welches zuvor mittels dem in Abschnitt 5.3.1.3.2 vorgestellten VBA-Skript zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung generiert und anschließend in das Simulationsmodell, zur Berechnung der daraus resultierenden Werte für die einzelnen Zielgrößen, implementiert wurde. In *Schritt 2* hat durch Anwendung des entwickelten Bewertungsinstrumentariums die Bewertung und Darstellung (in Form von Kennlinien) des Einflusses sowie der Auswirkungen einer gewählten Losgrößen- und Reihenfolgealternative auf die logistischen Zielgrößen und Kosten zu geschehen. Somit können verschiedenste Losgrößen- und Reihenfolgealternativen gegenübergestellt, die daraus resultierenden Ergebnisse miteinander verglichen sowie Schlussfolgerungen bezgl. des (notwendigen) Handlungsbedarfs gezogen werden.

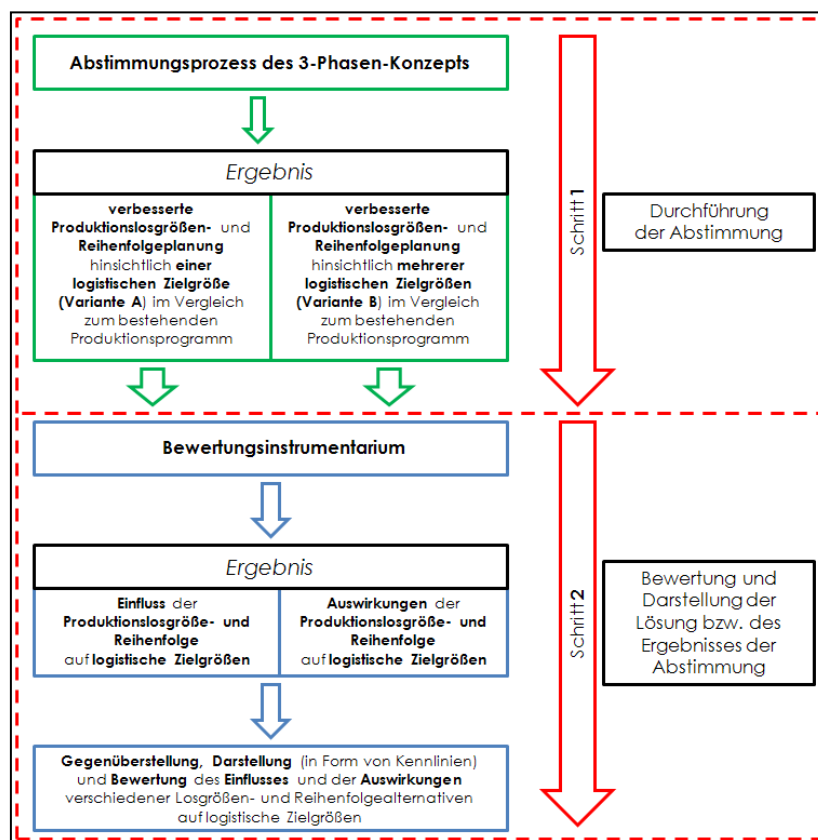


Abbildung 107: Zusammenhang Vorgehenskonzept und Bewertungsinstrumentarium<sup>703</sup>

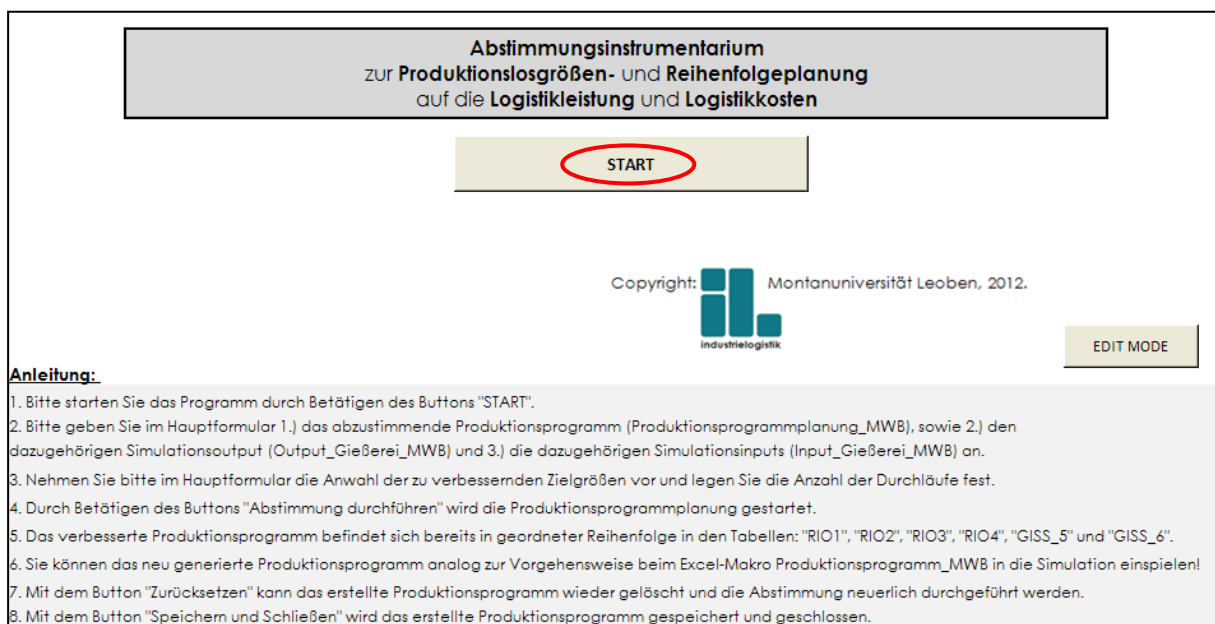
<sup>703</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

### 5.3.3.1.1 Abstimmungsprozess des 3-Phasen-Konzepts

Dieser Abschnitt hat die Beschreibung der Umsetzung des Abstimmungsprozesses des in Kapitel 4 entwickelten 3-Phasen-Konzepts zum Inhalt.

Die Ausgangsbasis zur Abstimmung stellt ein mittels des VBA-Skripts zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung generiertes Produktionsprogramm (siehe dazu Abschnitt 5.3.1.3.2) dar. Dieses bestehende Programm, welches bereits alle zu berücksichtigenden Restriktionen, welche im betrachteten Produktionssystem bei der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auftreten, enthält, muss zunächst für die Anwendung des Abstimmungsinstrumentariums in das Simulationsmodell implementiert werden, um wie in Abbildung 99 dargestellt, die daraus resultierenden Zielgrößen erhalten zu können.

Der Benutzer kann durch Anwahl des Buttons „START“ im Excel-Makro Abstimmungsinstrumentarium<sup>704</sup> (siehe dazu rote Markierung in Abbildung 108), den Vorgang des Abstimmungsprozesses starten. Weiters ist auf der Benutzeroberfläche, wie auch schon beim VBA-Skript zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung eine Kurzanleitung für den Benutzer angegeben.



**Abbildung 108: Benutzeroberfläche Abstimmungsinstrumentarium<sup>705</sup>**

Nach Betätigen des Starts erscheint das Hauptformular des Abstimmungsinstrumentariums, in welchem der Benutzer aufgefordert wird zunächst das bestehende Produktionsprogramm (siehe dazu Abbildung 109, 1.) sowie das dazugehörige Outputfile der Simulationsergebnisse (siehe 2. in Abbildung 109) und die für die Simulation verwendete Inputdatei zu öffnen (siehe dazu Abbildung 109, 3.). Im Anschluss daran kann dieser bis zu maximal drei Zielgrößen auswählen (siehe Abbildung 109, 4.), hinsichtlich denen die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung vorgenommen werden sollen. Bei Anwahl der Zielgröße Produktmix muss zusätzlich noch das

<sup>704</sup> Siehe dazu Excel-Makro Abstimmungsinstrumentarium auf der beigelegten CD.

<sup>705</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Aggregat angegeben werden (siehe Abbildung 109, 5.). Gibt der Benutzer eine Datei falsch an oder wird eine notwendige Eingabe vergessen, so wird dieser über dementsprechende Fehlermeldungen informiert (z.B. wenn keine Zielgröße angewählt wird, erscheint die in Abbildung 110 gezeigte Fehlermeldung). Ebenso hat dieser die Anzahl der Durchläufe an Vergleichen zwischen der bestehenden und neu generierten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative, welche auf maximal 20 begrenzt sind, anzugeben (6. in Abbildung 109). Durch Betätigen des Buttons „Abstimmung durchführen“ (7. in Abbildung 109) wird die Abstimmung der durch den Benutzer festgelegten Zielgrößen hinsichtlich einer bestehenden Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative begonnen.<sup>706</sup>

Abbildung 109: Hauptformular Abstimmungsinstrumentarium<sup>707</sup>

<sup>706</sup> Siehe dazu Weiters Bedienungsanleitung - Abstimmungs- und Bewertungsinstrumentarium auf der beigelegten CD.

<sup>707</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.



Abbildung 110: Fehlermeldung - Anwahl mindestens einer Zielgröße<sup>708</sup>

Je nachdem, ob durch die Abstimmung eine bessere Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative im Vergleich zur bestehenden gefunden wurde, erscheint ein Infocfeld, welchen den Benutzer darüber informiert (siehe dazu Abbildungen 111 und 112).



Abbildung 111: Infocfeld - durch Abstimmungsprozess bessere Lösung gefunden<sup>709</sup>

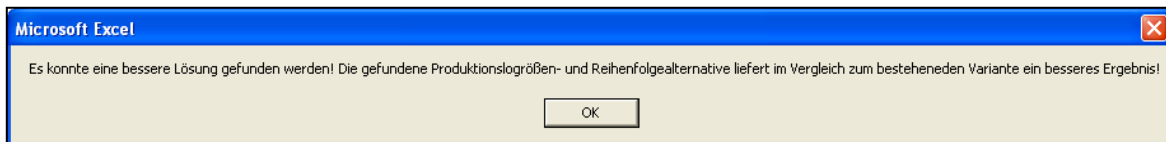


Abbildung 112: Infocfeld - durch Abstimmungsprozess keine bessere Lösung gefunden<sup>710</sup>

Wurde eine bessere Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative im Vergleich zur bestehenden gefunden, so erhält der Benutzer als Ergebnis ein neu generiertes Produktionsprogramm (siehe dazu Abbildung 113), welches dieser analog zum bestehenden VBA-Skript zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung wieder in die Simulation einspielen und damit testen kann (siehe dazu Abbildung 103 und 8. in Abbildung 109). Auch hierbei wird wieder eine Importdatei erstellt, welche alle für die Simulation notwendigen Inputdaten enthält. Ident zum VBA-Skript zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung sind die Funktionen der Button „Zurücksetzen“, „Speichern & Schließen“ sowie „INFO“ (siehe dazu ausführlich Abschnitt 5.3.1.3.2 und 9. in Abbildung 109).

|   |       |                       |     |      |
|---|-------|-----------------------|-----|------|
| 3 | 00145 | RUNDB.AG 0,1 P        | 176 | 2800 |
| 3 | 00145 | RUNDB.AG 0,1 P        | 176 | 3600 |
| 3 | 00145 | RUNDB.AG 0,1 P        | 176 | 3600 |
| 3 | 00145 | RUNDB.AG 0,1 P        | 176 | 3600 |
| 3 | 00145 | RUNDB.AG 0,1 P        | 176 | 3600 |
| 3 | 00145 | RUNDB.AG 0,1 P        | 176 | 3600 |
| 3 | 00145 | RUNDB.AG 0,1 P        | 176 | 3600 |
| 3 | 00145 | RUNDB.AG 0,1 P        | 305 | 2800 |
| 3 | 00145 | RUNDB.AG 0,1 P        | 305 | 2800 |
| 3 | 00145 | RUNDB.AG 0,1 P        | 305 | 3600 |
| 3 | 00106 | RUNDB.MB ETP          | 115 | 1500 |
| 3 | 00110 | RUNDB.MB ETP (HOLD SO | 150 | 2000 |
| 3 | 00110 | RUNDB.MB ETP (HOLD SO | 150 | 2000 |
| 3 | 00162 | RUNDB.MB CUS          | 203 | 800  |
| 3 | 00162 | RUNDB.MB CUS          | 203 | 800  |
| 3 | 00162 | RUNDB.MB CUS          | 254 | 900  |
| 3 | 00162 | RUNDB.MB CUS          | 254 | 900  |

Abbildung 113: Auszug - Ergebnis Abstimmungsinstrumentarium<sup>711</sup>

<sup>708</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>709</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>710</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Bevor die Anwendung dessen am konkreten Beispiel der Kupferhütte (in Abschnitt 5.4.1.1) erläutert wird, erfolgt zunächst die Beschreibung des im Abstimmungsinstrumentariums enthaltenen Algorithmus, mit Hilfe dessen die Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf eine (Variante A) oder mehrere (Variante B) Zielgrößen realisiert werden kann. Der Abstimmungsprozess des Vorgehenskonzepts wurde, wie bereits erwähnt, in Form eines VBA-Skripts konkretisiert, welches ergänzend, zu den im Losgrößen- und Reihenfolgeplanungsskript enthaltenen identen Modulen DURCHLAUFZEIT und SIMULATION, die Module ARBEITSPLAN, PERMUTATION, DURCHLAUFZEITP, ZIELFUNKTION, ZIELFUNKTIONP und MAP beinhaltet. Die einzelnen Module sowie deren Funktionen und Methoden sind in Anhang 3<sup>712</sup> im Detail erläutert.

**Algorithmus zur Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf logistische Zielgrößen:**

Bei diesem Algorithmus handelt es sich um eine Permutation der Auftragszuweisung und zufälligen Sortier- und Schlichtungsvorgänge. Die Autorin entschied sich aufgrund der Tatsache, dass bei der Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen sehr rechenaufwendige Zielfunktionen vorliegen, welche zwar mittels anderer mathematischer Lösungsverfahren, welche einen geeigneteren Ansatz für die vorliegende Problematik darstellen, jedoch zu viel Rechenzeit in Anspruch nehmen würden, für diesen Lösungsansatz.

Zwar wurde zunächst überlegt eine generische Permutation durchzuführen, jedoch müsste hierbei nach jeder Permutation die „Gesundheit“ der neuen Losgrößen- und Reihenfolgevariante (Fitnessfunktion) berechnet werden, was aufgrund der Tatsache, dass die Programmierung in Visual Basic for Applications durchgeführt wurde, nicht in einem vertretbaren Zeit- bzw. Rechenaufwand realisierbar gewesen wäre.

**a) Permutationen:**

Im verwendeten Algorithmus wird eine festgelegte Anzahl an Permutationen durchlaufen. Dabei wird über einen Zufallsgenerator festgelegt, bei welchen Aggregaten die Aufträge vertauscht werden sollen. Wählt der Zufallsgenerator dasselbe Aggregat zweimal aus, wird die Permutation beendet. Dieser legt weiter fest, ob ein Auftrag oder die gesamte Qualität, welche es herzustellen gilt, zwischen zwei Aggregaten vertauscht werden soll. Im Anschluss daran werden wieder zwei Zufallszahlen generiert, welche die Zeile, in welcher der Auftrag gespeichert ist, angeben. Eine weitere Zufallsvariable bestimmt, ob eine Permutation überhaupt durchgeführt werden soll.

*Wenn Durchführen < 30% dann*

*Keine Permutation*

<sup>711</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>712</sup> Siehe dazu Anhang 3 auf der beigelegten CD.

Im Anschluss daran werden die Qualitäten bzw. die Aufträge getauscht. Eine Ausnahme stellen im Fallbeispiel die Qualitäten AG, OF101 und P-40 dar, da diese aufgrund von Herstellungsrestriktionen (siehe dazu Abschnitt 5.3.1.3.2) einem Aggregat fix zugeordnet sind.

Wenn QualitätAuftrag1 = „AG“ oder „OF 101“ oder „P-40“ dann

Abbrechen

Ende

Wenn Durchführen > 30% dann

solange Qualität von Auftrag1 = aktuelle Qualität

Zeile = Zeile - 1

aktuelle Zeile = aktuelle Zeile - 1

Nächste Zeile

Beginn Auftrag/Qualität = Zeile

solange Qualität von Auftrag1 = aktuelle Qualität

Zeile = Zeile + 1

aktuelle Zeile = aktuelle Zeile + 1

Nächste Zeile

Ende Auftrag /Qualität = Zeile

Dies wird auch für das zweite Aggregat durchgeführt, bevor es zur eigentlichen Vertauschung kommt.

Aggregat1.zeilen(Beginn Auftrag/Qualität1 bis Ende Auftrag/Qualität1).ausschneiden

Aggregat2.zeile(Ende Auftrag/Qualität2+1).einfügen

Aggregat2.zeilen(Beginn Auftrag/Qualität2 bis Ende Auftrag/Qualität2).ausschneiden

Aggregat1.zeile(Ende Auftrag/Qualität1+1).einfügen

leereZeilen.löschen

Nach dem Vertauschen der Aufträge zwischen den Aggregaten, folgt eine festgelegte Anzahl an Permutationen innerhalb des Aggregats. Hierbei werden wieder zufällig ein Aggregat sowie zwei Zeilen (mit Aufträgen) ausgewählt, welche nicht zu knapp bei einander liegen.

Wenn Absolut(Zeile1 - Zeile2) < 50 dann

Nochmals starten

Ende

Schematisch dargestellt, sieht eine Permutation wie folgt aus:

Wenn Zeile1 > Zeile2 dann

Aggregat.zeilen(Beginn Auftrag1 bis Ende Auftrag1).ausschneiden

Aggregat.zeile(Ende Auftrag2).einfügen

Aggregat.zeilen(Beginn Auftrag2 bis Ende Auftrag2).ausschneiden

Aggregat.zeile(Ende Auftrag1+1).einfügen

Sonst

Aggregat.zeilen(Beginn Auftrag2 bis Ende Auftrag2).ausschneiden  
 Aggregat.zeile(Ende Auftrag1).einfügen  
 Aggregat.zeilen(Beginn Auftrag1 bis Ende Auftrag1). ausschneiden  
 Aggregat.zeile(Ende Auftrag2+1).einfügen  
 Ende

Beachtung hat die Tatsache zu finden, dass immer jener Auftrag, welcher in der Liste weiter unten steht, zuerst getauscht werden muss, da sich ansonsten die Zeilen verschieben würden. Auch bei der zufälligen Sortierung werden ein Aggregat und die zu sortierende Spalte mittels einer Zufallsvariablen ausgewählt.

Aggregat.spalte(zufallSpalte).sortieren(A-Z)

Erst nachdem die festgelegte Anzahl an Permutationen ausgeführt wurde, werden die zuvor durch den Benutzer festgelegten Zielgrößen berechnet (z.B. Durchlaufzeit und Auslastung).

Zielfunktionen.Methode.Durchlaufzeit.starten  
 Zielfunktionen.Methode.Auslastung.starten

**b) Berechnung der Zielfunktionen beim Abstimmungsprozess:**

Im Nachfolgenden werden die Berechnungen der einzelnen Zielfunktionen im Abstimmungs-instrumentarium erläutert:

**Termin-treue:**

Für die Berechnung der Termintreue wird die Summe aller verspäteten Aufträge herangezogen. Je näher dieser Wert bei 0 liegt, desto besser.

Von Aggregat1 bis Aggregatx  
     Von Zeile1 bis Zeilex  
 Wenn Terminabweichung < 0 dann  
         Summe der Abweichungen = Summe der Abweichung + Terminabweichung  
 Ende  
     Nächste Zeile  
 Nächstes Aggregat  
 Termintreue = Summe der Abweichungen

**Auslastung:**

Die Berechnung der Auslastung erfolgt über den Quotienten aus der kleinsten zur größten Bearbeitungszeit. Ist die Auslastung gleich 1, wird eine gleichmäßigere Auslastung, bei welcher alle Aggregate gleich lange beschäftigt sind, erreicht.

Von Aggregat1 bis Aggregatx  
     Von Auftrag1 bis Auftragx  
     GesamtBearbeitungszeit[Agrx] = GesamtBearbeitungszeit[Agrx]+Bearbeitungszeit

Nächster Auftrag

Nächstes Aggregat

Auslastung =  $\text{minimum}(\text{GesamtBearbeitungszeit}) / \text{maximum}(\text{GesamtBearbeitungszeit})$

**Produktmix:**

Dabei erfolgt die Überprüfung der ermittelten Produktionslosgrößen in Abhängigkeit der herzustellenden Qualitäten je Aggregat. Die einzelnen  $V_x$ -Werte berechnen sich aus dem Quotienten der Losgröße einer Qualität zur Gesamtmenge der Qualität auf einem Aggregat. Diese werden aufsummiert und die Zielgröße für den Produktmix ergibt sich aus dem Durchschnitt aller  $V_x$ -Werte je Aggregat.<sup>713</sup>

Von Aggregat1 bis Aggregatx

Von Auftrag1 bis Auftragx

Wenn  $\text{gesamteMenge}(\text{Qualität}).\text{name} = \text{Qualität}$  dann

$\text{gesamteMenge}(\text{Qualität}).\text{gewicht} = \text{gesamteMenge}(\text{Qualität}).\text{gewicht} + \text{gewicht}$

Ende

Nächster Auftrag

Nächstes Aggregat

Von Aggregat1 bis Aggregatx

Von Auftrag1 bis Auftragx

Wenn  $\text{Qualität} = \text{Auftragx}.\text{Qualität}$  dann

$\text{Losgröße} = \text{Losgröße} + \text{Auftragx}.\text{gewicht}$

Sonst

$\text{Summeder}V_x = \text{Summeder}V_x + (\text{Losgröße} / \text{gesamteMenge}(\text{Qualität}))$

$\text{Anzahlder}V_x = \text{Anzahlder}V_x + 1$

$\text{Qualität} = \text{nächsteQualität}$

$\text{Losgröße} = \text{nächsteQualität}.\text{gewicht}$

Ende

Nächster Auftrag

Nächstes Aggregat

$\text{Produktmix} = \text{Summeder}V_x / \text{Anzahlder}V_x$

**Durchlaufzeit und Fertigungsbestand:**

Die Bestimmung der Zielfunktionen dieser beiden Zielgrößen ist am rechenaufwendigsten, da zur Berechnung derer eine Simulation in Excel nachgestellt werden muss.<sup>714</sup>

Von *aktuelleZeit* bis *Endzeit*

Von *Maschine1* bis *Maschinex*

Von *Auftrag1* bis *Auftragx*

<sup>713</sup> Siehe dazu ausführlich S. 166 f. und Anhang 5, S. 9 f.

<sup>714</sup> Siehe dazu ausführlich Anhang 3, S. 19 ff. auf der beigelegten CD.



```

        Wenn aktuelleZeit > Bearbeitungszeit dann
            Wenn nächsteMaschinevorhanden = WAHR dann
                Auftrag.umlagern(nächsteMaschine)
                nächsteZeit(nächsterMaschine) = Auftrag.Bearbeitungszeit
            Sonst
                Auftrag.umlagern(Rollengangelager)
            Ende
        Ende
    Nächster Auftrag
    Nächste Maschine
    Wenn Sägefertig = WAHR dann
        Sägezeit = Rollenganlager.ersterAuftrag.Bearbeitungszeit
        nächsteZeit(Säge) = Sägezeit
        Rollenganlager.ersterAuftrag.umlagern(Säge)
    Ende
    Wenn aktuelleZeit / 2:00:00 Rest = 0 dann
        summeBestand = summeBestand + Rollengangelager.gesamterBestand
        AnzahlderBestände = AnzahlderBestände + 1
    Ende
    aktuelleZeit = minimum(nächsteZeit())
    Wenn AnzahlderAufträge = GesamtanzahlderAufträge
        Stop
    Ende
    Nächste Zeit
    Durchlaufzeit = aktuelleZeit
    Bestand = summeBestand / AnzahlderBestände
    
```

**Herstellkosten:**

Auch für die Verbesserung der gesamten Herstellkosten, d.h. der während der Produktion tatsächlich anfallenden Kosten, musste ein Produktionsdurchlauf in Excel nachsimuliert werden, um die sich aus der neu generierten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung resultierende Durchlaufzeit ermitteln zu können. Dies ist notwendig um die zeitabhängigen Kosten der Aggregate bestimmen zu können.

Von Aggregat1 bis Aggregatx

Von Auftrag1 bis Auftragx

Kosten = Kosten + Auftragx.gewicht \* KostenjeTonnejeQualität

Kosten = Kosten + Auftragx.gewicht \* KostenjeTonnejeAggregat

Nächster Auftrag

$$\text{Kosten} = \text{Kosten} + \text{Aggregatx.Rüstzeit} * \text{KostenjeMinute}$$

$$\text{Kosten} = \text{Kosten} + \text{KostensatzjeStundejeAggregat} * \text{Durchlaufzeit}$$

Nächstes Aggregat

Herstellkosten = Kosten

Die Zielgröße Umstellaufwand wurde am Fallbeispiel der Gießerei nicht in das Abstimmungsinstrumentarium implementiert, da die Umstellungen nach jedem Strangabguss erfolgen müssen und eine feste Zeitdauer aufweisen und daher sowohl die Anzahl als auch die Zeitdauer derer nicht direkt durch die Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung beeinflussbar ist.

### c) Vergleich der Zielfunktionen:

Nachdem die Zielfunktionen der einzelnen Zielgrößen ermittelt wurden, wird der Vergleich angestellt, ob diese eine bessere Lösung als die bereits bestehenden darstellen. Wurde eine bessere Lösung gefunden, wird die neue Produktionslosgrößen- und Reihenfolgevariante übernommen, falls nicht, startet die Permutation mit der bestehenden Produktionslosgrößen- und Reihenfolgevariante erneut (je nach Benutzereingabe der Anzahl der Durchläufe im Hauptformular des Abstimmungsinstrumentariums).

Von Zielgröße1 bis Zielgröße6

Wenn Zielgrößex.wurdeausgewählt = WAHR dann

Wenn Zielgrößex.Lösungistbesser = WAHR dann

Anzahlbesser = Anzahlbesser + 1

Ende

Ende

Nächste Zielgröße

Wenn Anzahlbesser = AnzahlausgewählterZielgrößen dann

Alte Variante = Neue Variante

Sonst

Neue Variante.löschen

Ende

Permutation.starten

### d) Zusammenführen der Aufträge:

Nach Abschluss aller Durchläufe werden wie Aufträge der einzelnen Aggregate wieder gebündelt und damit die Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung je Aggregat fixiert:

Von Aggregat1 bis Aggregatx

Qualität = Aggregatx.Auftrag1.Qualität

Durchmesser = Aggregatx.Auftrag1.Durchmesser

Von Auftrag2 bis Auftragx

Wenn Qualität = Auftragx.Qualität und Durchmesser = Auftragx.Durchmesser dann

summeLänge = summeLänge + Auftragx.länge

```

        summeGewicht = summeGewicht + Auftragx.gewicht
        Wenn summeLänge >= LängeStrangjeAggregat dann
            summeLänge = 0
            AnzahlStränge = AnzahlStränge + 1
        Ende
    Sonst
        summeLänge = 0
        AnzahlStränge = AnzahlStränge + 1
        GesamtGewicht = summeGewicht
        GesamtStränge = AnzahlStränge
        Qualität = nächsteQualität
        Durchmesser = nächsterDurchmesser
        Gesamtgewicht = nächsterAuftrag.gewicht
    Ende
    Nächster Auftrag
    summeLänge = 0
    AnzahlStränge = AnzahlStränge + 1
    GesamtGewicht = summeGewicht
    GesamtStränge = AnzahlStränge
Nächstes Aggregat
Von Aggregat1 bis Aggregatx
    Von zusammengefassterAuftrag1 bis zusammengefassterAuftragx
        BerechnungderLeistung
        BerechnungderBearbeitungszeit
    Von zusammengefassterAuftragx.Strang1 bis zusammengefassterAuftragx.Strangx
        Säge.StrangHinzfügen
        Säge.neuerStrang.BerechnungSchnitte
        Säge.neuerStrang.BerechnungBearbeitungszeit
    Nächster Strang
    Nächster zusammengefassterAuftrag
Nächstes Aggregat

```

Nach der Durchführung des Abstimmungsprozesses kann, wie bereits erwähnt, die aus dem Abstimmungsprozess resultierende Produktionslosgrößen- und Reihenfolgevariante wieder direkt in das Simulationsmodell implementiert werden.

Im Anschluss daran ist es möglich, unter Zuhilfenahme des Bewertungsinstrumentariums, die Fragestellung zu beantworten (sowie graphisch in Form von Kennlinien zu veranschaulichen), welchen Einfluss und welche Auswirkungen die neu generierte Losgrößen- und Reihenfolgeal-

ternative auf die logistischen Zielgrößen im Vergleich zum bestehenden Produktionsprogramm hat. Dieses „Werkzeug“ wird nun im nachfolgenden Absatz erläutert.

### 5.3.3.1.2 Bewertungsinstrumentarium

Die Umsetzung des Bewertungsinstrumentariums erfolgte ebenfalls mittels VBA-Skript, welches nun nachfolgend beschrieben wird. Der Programmiercode dazu ist in Anhang 4<sup>715</sup> im Detail erläutert.

Zunächst muss der Benutzer den Pfad der Excel-Dateien, welche die Simulationsergebnisse sowohl der bestehenden (Output\_Gießerei\_MWB\_B) als auch der neu generierten Losgrößen- und Reihenfolgealternative (Output\_Gießerei\_MWB\_A) enthalten, angeben (siehe dazu Bedienungsanleitung Abstimmungs- und Bewertungsinstrumentarium auf der beigelegten CD). Dabei ist entscheidend, dass der Benutzer die Dateien in der richtigen (absteigenden) Reihenfolge angibt, welche zu vergleichen sind (in diesem Fall (Abbildung 114) wird Produktionslosgröße A zu B verglichen).

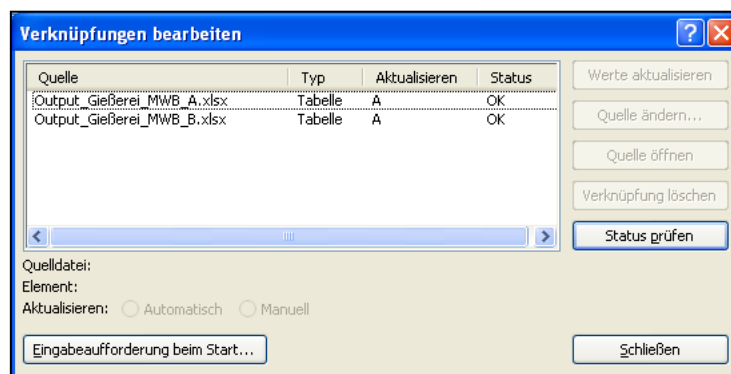


Abbildung 114: Angabe der Outputdateien der Simulationsläufe<sup>716</sup>

Sobald die richtigen Dateien angegeben wurden, wird im Bewertungsinstrumentarium automatisch die Berechnung der Einflussfaktoren (E-Faktoren) vorgenommen und der Benutzer erhält sofort die berechneten Einflussfaktoren einer gewählten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative im Vergleich zu einer zweiten Variante auf der Benutzeroberfläche des Bewertungsinstrumentariums (siehe dazu Abbildung 115) angezeigt.

Im konkreten Fallbeispiel wurden, die aus der Anwendung des Abstimmungsprozesses resultierende Losgrößen- und Reihenfolgealternative mit der bestehenden Variante verglichen (siehe dazu Abschnitt 5.4.1.2). Durch die farbliche Markierung, wobei grün eine positive Beeinflussung bzw. Auswirkung bedeutet, orange einen vernachlässigbar geringen Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge und rot einen negativen Einfluss bzw. Auswirkung der gewählten Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die betrachteten Zielgrößen repräsentiert, kann

<sup>715</sup> Siehe dazu Anhang 4 auf der beigelegten CD.

<sup>716</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

der Benutzer auf einen Blick den Einfluss und die Auswirkungen einer Losgrößen- und Reihenfolgealternative (im Vergleich zu einer zweiten) auf die einzelnen Zielgrößen erkennen.

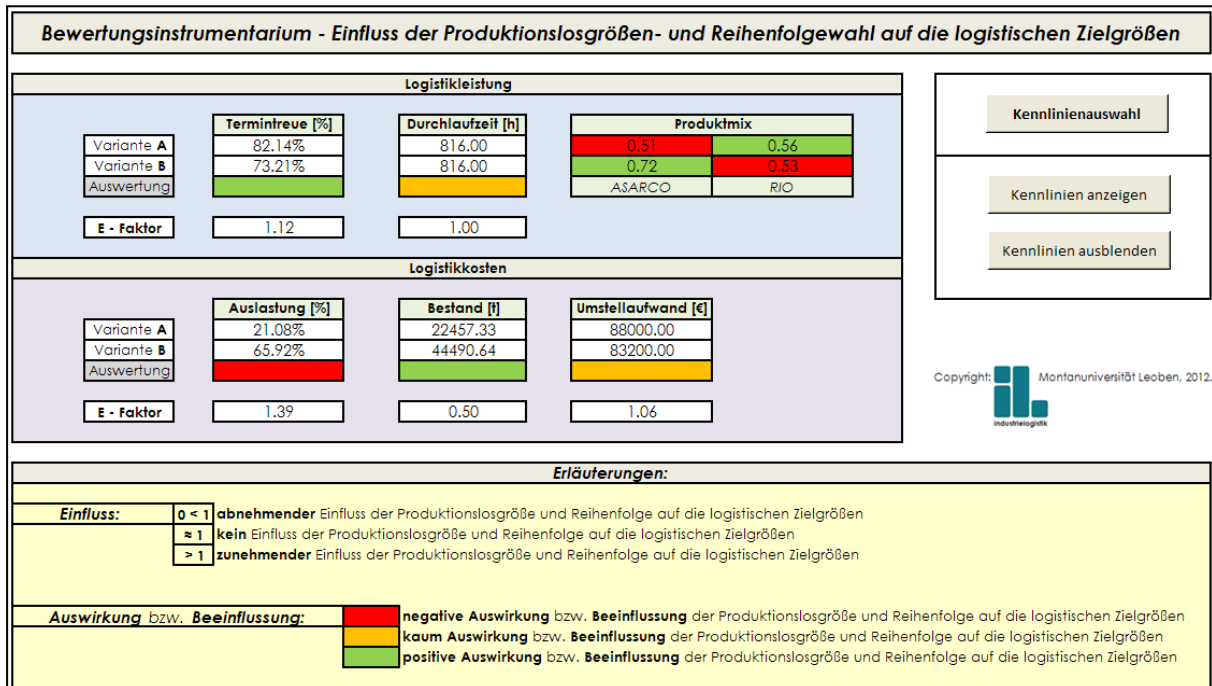


Abbildung 115: Benutzeroberfläche VBA-Skript und Ergebnis Bewertungsinstrumentarium<sup>717</sup>

Weiters kann durch Anwahl des Buttons „Kennlinien anzeigen“ die Darstellung der Kennlinienverläufe für alle Zielgrößen angewählt (siehe dazu Abbildung 115) oder durch Anwahl des Buttons „Kennlinienauswahl“ der Kennlinienverlauf einzelner Zielgrößen ausgewählt werden (siehe dazu Abbildungen 115 und 116), um so den Einfluss mehrerer Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternativen auf die logistischen Zielgrößen in Form von Kennlinien darzustellen (siehe beispielhaft dazu Auszug in Abbildung 117 für die Zielgröße Termintreue).<sup>718</sup>

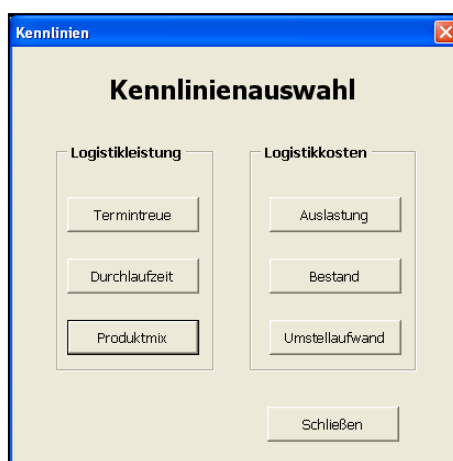


Abbildung 116: Kennlinienauswahl<sup>719</sup>

<sup>717</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>718</sup> Siehe dazu Excel-Makro Bewertungsinstrumentarium auf der beigelegten CD.

<sup>719</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Durch die graphische Veranschaulichung wird es dem Benutzer ermöglicht, eine schnelle „Analyse“ dahingehend durchzuführen, welche Produktionslosgröße und Reihenfolge (d.h. im konkreten Fall entweder die bestehende oder neu generierte) sich am besten für die jeweilige Zielgröße „eignet“ bzw. zu den besten Resultaten (wie beispielsweise den geringsten fixen Kosten je Tonne, der höchsten Termintreue, der kürzesten Durchlaufzeit usw.) führt.<sup>720</sup>

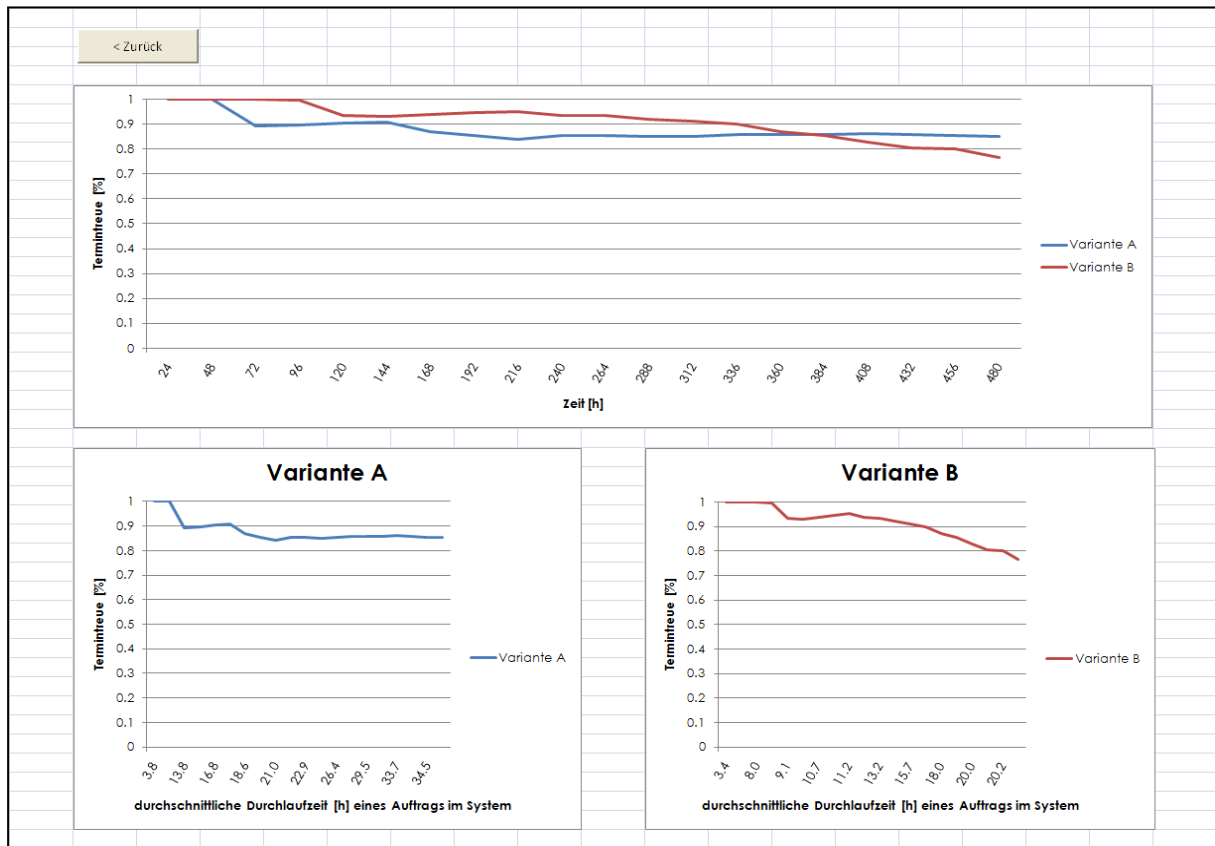


Abbildung 117: Kennliniendarstellung am Beispiel der Zielgröße Termintreue<sup>721</sup>

Mittels Betätigen des Buttons „Zurück“ gelangt dieser wieder auf die Benutzeroberfläche des Bewertungsinstrumentariums zurück (siehe dazu Abbildung 117). Durch Anwahl des Buttons „Kennlinien ausblenden“ kann die Kennliniendarstellung jederzeit zurückgesetzt werden (siehe dazu Abbildung 115).

### 5.3.4 Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Simulationsergebnisse, welche aus den in Abschnitt 5.3.2 erläuterten Testläufen resultieren, beschrieben.

Die aus den Simulationsläufen resultierenden Ergebnisse bzw. Werte der gemessenen Zielgrößen werden nach Simulationsabschluss durch das Ausführen der Methode „EXPORT\_Daten“ (siehe dazu 5.3.1.3.3) in die Excel-Datei „Output\_Gießerei\_MWB“ übertragen. Dabei handelt es sich u.a. um die erreichte Termintreue, der Auslastung des gesamten Produktionssystems

<sup>720</sup> Siehe dazu weiter Bedienungsanleitung Abstimmungs- und Bewertungsinstrumentarium auf der beigelegten CD.

<sup>721</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

sowie der einzelnen Aggregate, der Durchlaufzeit, der Bestände (d.h. der über die gesamte Produktionsdauer insgesamt auf Lager liegenden Auftragsmenge) in allen Lager- und Fertigungsstufen, der erzielten Gesamtleistung des Arbeitssystems sowie der einzelnen Aggregate, aller anfallenden Kosten<sup>722</sup> (der Herstell-, Rüst-, Prüf-, Lager-, und Leerkosten sowie der fixen Kosten pro Tonne je Aggregateinheit u.a.), der mittels einer Zeitleiste aufgenommenen Werte des WIP und viele mehr. Eine detaillierte Beschreibung des dazu erstellten Excel-Makros „Output\_Gießerei\_MWB“<sup>723</sup> sowie des gesamten Simulationsoutputs (siehe dazu Auszug in Abbildung 118), befindet sich in Anhang 5.<sup>724</sup>

| Output - Produktionskennzahlen Gießerei MWB |   |  |       |
|---|---|--|-------|
| Terminstreue [%]                            | Gesamtdurchlaufzeit [ZE]  | Gesamtbestand [t]                            |       |
| 85.65%                                      | 21:10:33.43.1203  | 42236.34                                     | [t]   |
|   |   | Bestand <b>Rollengangelager</b> [t]          |       |
|   |   | 6948.41                                      | [t]   |
|   | Rüstzeit gesamt [ZE]  | Bestand <b>Prüflager</b> [t]                 |       |
|   | 19:20:00.0000   | 12101.88                                     | [t]   |
|   | Rüstzeit <b>ASARCO_Gießbofen_5_Gießanlage_3_Gießbofen_6_Gießanlage_4</b> [ZE] | Bestand <b>Versandlager</b> [t]              |       |
|   | 2:40:00.0000  | 23186.06                                     | [t]   |
|   | Rüstzeit <b>RIO_1_4_Gießanlage_1_2</b> [ZE]                                   | Bestand <b>Rollengang- und Prüflager</b> [t] |       |
|   | 16:40:00.0000   | 35287.94                                     | [t]   |
|   | Rüstzeit <b>SAEGE_1_2</b> [ZE]  |  |       |
|   |   |  |       |
|   | Gesamtleistung [t/h]  |  |       |
|   | 13.63   |  | [t/h] |
|   | Leistung <b>ASARCO</b> [t/h]  |  |       |
|   | 15.98   |  | [t/h] |

Abbildung 118: Auszug Excel-Makro „Output\_Gießerei\_MWB“<sup>725</sup>

Die je nach Wahl des Betriebsmodus (Normalbetrieb oder Vollausslastung) und des zugrundeliegenden Produktionsprogramms erhaltenen Simulationsergebnisse wurden nach Rücksprache mit den verantwortlichen Personen der Kupferhütte am Jahr 2011 überprüft, um einerseits eine Aussage darüber zu erhalten, wie gut das Simulationsmodell die realen Gegebenheiten abbildet und andererseits den Vergleich zwischen der ursprünglichen und der aus dem Abstimmungsprozess des 3-Phasen-Konzepts resultierenden Losgrößen- und Reihenfolgeplanung anstellen zu können.

Im Nachfolgenden werden nicht alle aus den Simulationsläufen resultierenden Ergebnisse aufgelistet, sondern diese beispielhaft an den Zielgrößen Termintreue, Auslastung, Bestand, Prüf-, Lager- und Produktionskosten für die Monate März und Oktober 2011 diskutiert (für die detaillierten Simulationsergebnisse aller gemessenen Kennzahlen der Testläufe siehe Excel-Dateien Output\_Gießerei\_MWB\_Fall\_1a-2b).<sup>726</sup> Vorweg ist noch zu erwähnen, dass jeweils ein Rinneinduktionsofen in der Gießerei der Kupferhütte in beiden Monaten nicht in Betrieb war.

**Fall 1a: Vollbetrieb mit ursprünglicher Losgrößen- und Reihenfolgeplanung (März 2011)**

Im ersten Testlauf wurde der Vollbetrieb, d.h. die Produktion an 7 Tagen die Woche zu je 3 Schichten für den auftragsstarken Monat März 2011 getestet. Die Basis für die

<sup>722</sup> Anmerkung: Keine Realdaten, sondern nur verschlüsselte Größenordnungen.

<sup>723</sup> Siehe ausführlich dazu Excel-Makro Output\_Gießerei\_MWB auf der beigelegten CD.

<sup>724</sup> Siehe dazu Anhang 5 auf der beigelegten CD.

<sup>725</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>726</sup> Siehe dazu ausführlich Excel-Dateien Output\_Gießerei\_MWB\_Fall\_1a-2b auf der beigelegten CD.

Produktionsprogrammerstellung stellte dabei die von der Arbeitsvorbereitung bereitgestellte Liste an Kundenaufträgen mit Liefertermin März 2011 dar. Aufgrund der vielen Kundenbestellungen im Frühjahr 2011, welche aufgrund der kapazitiven Grenzen aber nicht in einem Monat produziert werden konnten, wurde in der Realität mit der Produktion derer bereits schon Ende Februar begonnen bzw. reichte diese bis Anfang April hinein und durch die zeitliche Form der Anpassung<sup>727</sup>, d.h. durch Überstunden, realisiert (daher in Simulation Durchlaufzeiten > 30 Tage). In auftragsschwachen Monaten wurde dies dann wieder durch Schichtanpassungen (Normalbetrieb mit nur 5-Tage-Produktion) ausgeglichen. Für den Monat März ergaben sich auf Basis des bestehenden Produktionsprogramms die in der nachfolgenden Abbildung 119 aufgezeigten Ergebnisse für die einzelnen logistischen Zielgrößen und Kosten, wobei es sich bei den Kostenangaben um verschlüsselte Größenordnungen und keine Realdaten handelt.

| <i>bestehende Produktionslosgröße und Reihenfolge (Fall 1a)</i> |                  |                   |                |
|---|------------------|-------------------|----------------|
| Termintreue [%]   | Bestand [t]      | Durchlaufzeit [h] | Auslastung [%] |
| <b>74.31</b>  | <b>117308.20</b> | <b>900.06</b>     | <b>66.42</b>   |
| Produktionskosten [€]   |                  |                   |                |
| <b>4050578.47</b>   |                  |                   |                |
| Prüfkosten [€]  |                  | Lagerkosten [€]   |                |
| <b>212962.28</b>  |                  | <b>1235741.06</b> |                |

**Abbildung 119: Simulationsergebnisse für Testlauf - Fall 1a<sup>728</sup>**

So konnte bei Umsetzung des bestehenden Produktionsprogramms eine Termintreue von 74,31 % bei einer Durchlaufzeit von 900,06 h und einer Auslastung von 66,42 % erzielt werden. Die Produktionskosten betragen im Fall 1a 4.050.578,47 €, wobei Prüfkosten in der Höhe von 2.129.62,28 € und Lagerkosten von insgesamt 1.235.741,06 € für eine Bestandsmenge von 1.117.308,20 Tonnen anfielen.

### **Fall 1b: Vollbetrieb mit Losgrößen- und Reihenfolgeplanung aus Abstimmung (März 2011)**

Im Anschluss wurde auf das in Fall 1a ermittelte Produktionsprogramm das Abstimmungsinstrumentarium angewandt, um eine verbesserte Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die logistischen Zielgrößen und die während der Produktion anfallenden Kosten – in diesem Fall wurden die Herstellkosten und die Bestände fokussiert – erzielen zu können (Fall 1b). Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 120 aufgezeigt.

<sup>727</sup> Die zeitliche Anpassung ist eine Form der kurzfristigen Anpassung an Beschäftigungsschwankungen, bei der die Betriebszeit variiert wird, während der Bestand an Betriebsmitteln und Arbeitskräften sowie die Leistung konstant gelassen werden. Siehe dazu ausführlich Gutenberg (1983).

<sup>728</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.



| <i>mit Produktionslosgröße und Reihenfolge aus Abstimmungsinstrumentarium (Fall 1b)</i> |                  |                   |                |
|---|------------------|-------------------|----------------|
| Termintreue [%]   | Bestand [t]      | Durchlaufzeit [h] | Auslastung [%] |
| <b>55.20</b>  | <b>116639.04</b> | <b>827.33</b>     | <b>69.85</b>   |
| Produktionskosten [€]   |                  |                   |                |
| <b>3652585.67</b>   |                  |                   |                |
| Prüfkosten [€]  |                  | Lagerkosten [€]   |                |
| <b>212962.28</b>  |                  | <b>1228510.77</b> |                |

Abbildung 120: Simulationsergebnisse für Testlauf - Fall 1b<sup>729</sup>

Bei der Anwendung der neu generierten Produktionslosgröße und Reihenfolge wurde eine Termintreue von 55,20 % bei einer Durchlaufzeit von 827,33 h und einer Auslastung von 69,85 % erreicht. Produktionskosten fielen im Fall 1b in der Höhe von 3.652.585,67 € an, wobei die Prüfkosten 212.962,28 € und die Lagerkosten 1.228.510,77 € bei einem Lagerbestand von insgesamt 116.639,04 Tonnen betragen.

**Fall 2a: Normalbetrieb mit ursprünglicher Losgrößen- und Reihenfolgeplanung (Oktober 2011)**

Analog zu den Testläufen mit Vollbetrieb wurde auch ein Monat mit Normalbetrieb, d.h. hierbei erfolgt die Produktion an 5 Tagen die Woche zu je 3 Schichten, auf Basis der Auftragsliste von Oktober 2011 getestet. Die daraus resultierenden Ergebnisse (mit bestehender Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung) sind in Abbildung 121 dargestellt.

| <i>bestehende Produktionslosgröße und Reihenfolge (Fall 2a)</i> |                  |                   |                |
|---|------------------|-------------------|----------------|
| Termintreue [%]   | Bestand [t]      | Durchlaufzeit [h] | Auslastung [%] |
| <b>49.85</b>  | <b>103882.88</b> | <b>915.21</b>     | <b>57.99</b>   |
| Produktionskosten [€]   |                  |                   |                |
| <b>4265839.34</b>   |                  |                   |                |
| Prüfkosten [€]  |                  | Lagerkosten [€]   |                |
| <b>189390.15</b>  |                  | <b>1096529.45</b> |                |

Abbildung 121: Simulationsergebnisse für Testlauf - Fall 2a<sup>730</sup>

Hierbei wurde bei Umsetzung des bestehenden Produktionsprogramms eine Termintreue von 49,85 % bei einer Gesamtdurchlaufzeit von 915,21 h und einer Auslastung von 57,99 % erzielt. Die Produktionskosten betragen insgesamt 4.265.839,34 €. Der Bestand umfasste dabei

<sup>729</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>730</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

1.038.882,88 Tonnen, Prüfkosten fielen in der Höhe von 189.390,15 € und Lagerkosten in der Höhe von 1.096.529,45 € an.

**Fall 2b: Normalbetrieb mit Losgrößen- und Reihenfolgeplanung aus Abstimmung (Oktober 2011)**

Der letzte Testlauf wurde für den Normalbetrieb im Oktober 2011 durchgeführt, wobei auch hier aufbauend auf den Ergebnissen aus Fall 2a das Abstimmungsinstrumentarium hinsichtlich der Zielgrößen Termintreue und Auslastung angewendet wurde, um eine Verbesserung dieser Zielgrößen im Vergleich zur bestehenden Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung erreichen zu können.

So konnte für den Monat Oktober 2011 (siehe dazu Abbildung 122) durch die neu generierte Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung eine Termintreue von 53,27 % bei einer Durchlaufzeit von 699,10 h und einer Auslastung von 66,71 % erzielt werden. Die Produktionskosten betragen dabei 3.352.802,31 €, wobei Prüfkosten ident zum Fall 2a von 189.390,15 € anfielen und die Lagerkosten betragen bei einem Bestand von insgesamt 104.704,13 Tonnen 1.107.566,10 €.

| <i>mit Produktionslosgröße und Reihenfolge aus Abstimmungsinstrumentarium (Fall 2b)</i> |                  |                   |                |
|---|------------------|-------------------|----------------|
| Termintreue [%]   | Bestand [t]      | Durchlaufzeit [h] | Auslastung [%] |
| <b>53.27</b>  | <b>104704.13</b> | <b>699.10</b>     | <b>66.71</b>   |
| Produktionskosten [€]   |                  |                   |                |
| <b>3352802.31</b>   |                  |                   |                |
| Prüfkosten [€]  |                  | Lagerkosten [€]   |                |
| <b>189390.15</b>  |                  | <b>1107566.10</b> |                |

**Abbildung 122: Simulationsergebnisse für Testlauf - Fall 2b<sup>731</sup>**

Im folgenden Unterkapitel werden nun die wesentlichen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen, welche durch die Anwendung der entwickelten Instrumentarien erzielt werden konnten, aufgezeigt und im Detail erläutert.

## 5.4 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Dieser Abschnitt fokussiert die Umsetzung der entwickelten Modelle und zeigt die dadurch erzielten Einsparungs- und Verbesserungspotenziale auf.

<sup>731</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

### 5.4.1 Ergebnis der Verifizierung und Validierung der Modelle

Dieses Unterkapitel hat die durchgeführte Verifizierung und Validierung der entwickelten Modelle durch die Umsetzung am Beispiel der Gießerei einer Kupferhütte zum Inhalt.

Wie bereits in Abschnitt 3.5.3.3 erläutert, hat bereits während der Simulations- bzw. Modellentwicklung die laufende Verifizierung mit den realen Betriebsabläufen und Gegebenheiten des Produktionssystems zu erfolgen, um schwerwiegende Abbildungsfehler schon im Vorhinein vermeiden zu können. Dies wurde im vorliegenden Fallbeispiel durch die Diskussion mit den im Unternehmen verantwortlichen Personen<sup>732</sup> vorgenommen. Somit kann sichergestellt werden, dass die aus den Modellen erhaltenen Ergebnisse brauchbare und gültige Aussagen liefern und zur Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung herangezogen werden können.

#### 5.4.1.1 Wirkungskontrolle des Abstimmungsinstrumentariums

Nachfolgend wird die Wirkungskontrolle des Abstimmungsprozesses des 3-Phasen-Konzepts durchgeführt. Dabei wird überprüft, welche Ergebnisse bzw. Verbesserungspotenziale hinsichtlich der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung durch die Anwendung des Abstimmungsinstrumentariums im Vergleich zur Ausgangssituation in der Gießerei der Kupferhütte erzielt werden konnten.

Weiters werden in diesem Abschnitt daraus resultierende Schlussfolgerungen für die Monate März und Oktober 2011 gezogen und zukünftige Maßnahmen bzw. Handlungsbedarfe aufgezeigt.

Zunächst wurde das Abstimmungsinstrumentarium auf den Monat März 2011 hinsichtlich der Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die gesamten Herstellkosten und die Bestände angewandt (siehe dazu Fall 1a und 1b im vorigen Abschnitt). Dabei ist ersichtlich, dass durch die Anwendung des im Abstimmungsinstrumentarium enthaltenen Algorithmus im Vergleich zum bestehenden Produktionsprogramm der Bestand um 669,16 Tonnen reduziert werden konnte, was in einer Verringerung der gesamten Lagerkosten von 7230,29 € resultiert. Weiters wurde eine Senkung der Produktionskosten<sup>733</sup> in der Höhe von 397.992,80 € erzielt. Die Einsparungen der Produktionskosten resultieren in erster Linie aus der Senkung der Leerkosten, was durch die effizientere Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf Basis des Abstimmungsprozesses erreicht werden konnte. Weiters wurde dabei die Durchlaufzeit um 72,73 h gesenkt und die Auslastung im Vergleich zur bestehenden Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative um 3,43 % gesteigert. Anzumerken sei jedoch

---

<sup>732</sup> Vorwiegend Diskussion und Gespräche mit dem Leiter der Abteilung Forschung und Entwicklung und Qualitätsmanagement sowie dem Betriebsleiter der Gießerei und Platzbetriebe.

<sup>733</sup> Anmerkung: Keine Realdaten, sondern nur Größenordnungen.

an dieser Stelle, dass die Termintreue um 19,11 % gesunken ist. Dennoch überwiegen die durch die Anwendung des Abstimmungsinstrumentariums erzielten Verbesserungen eindeutig. In der nachfolgenden Abbildung 123 sind die Verbesserungspotenziale aller wesentlichen Zielgrößen zusammengefasst.

| VERBESSERUNGSPOTENZIALE I |             |                   |                |
|---------------------------|-------------|-------------------|----------------|
| Termintreue [%]           | Bestand [t] | Durchlaufzeit [h] | Auslastung [%] |
| -19.11                    | -669.16     | -72.73            | 3.43           |
| Produktionskosten [€]     |             |                   |                |
| -397992.80                |             |                   |                |
| Prüfkosten [€]            |             | Lagerkosten [€]   |                |
| 0.00                      |             | -7230.29          |                |

Abbildung 123: Verbesserungspotenzial I für März 2011<sup>734</sup>

Weiters sind in Abbildung 124 die aus der bestehenden (Fall 1a) und neu generierten Produktionslosgröße und Reihenfolge (Fall 1b) resultierenden Produktionskosten und der monetär bewertete Bestand in € gegenübergestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass der Bestand unwesentlich im Vergleich zu den Produktionskosten verbessert werden konnte, jedoch die aus der Anwendung des Abstimmungsinstrumentariums resultierende Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung eine erhebliche Reduzierung der Leerkosten und somit der gesamten Herstellungskosten bewirkt.

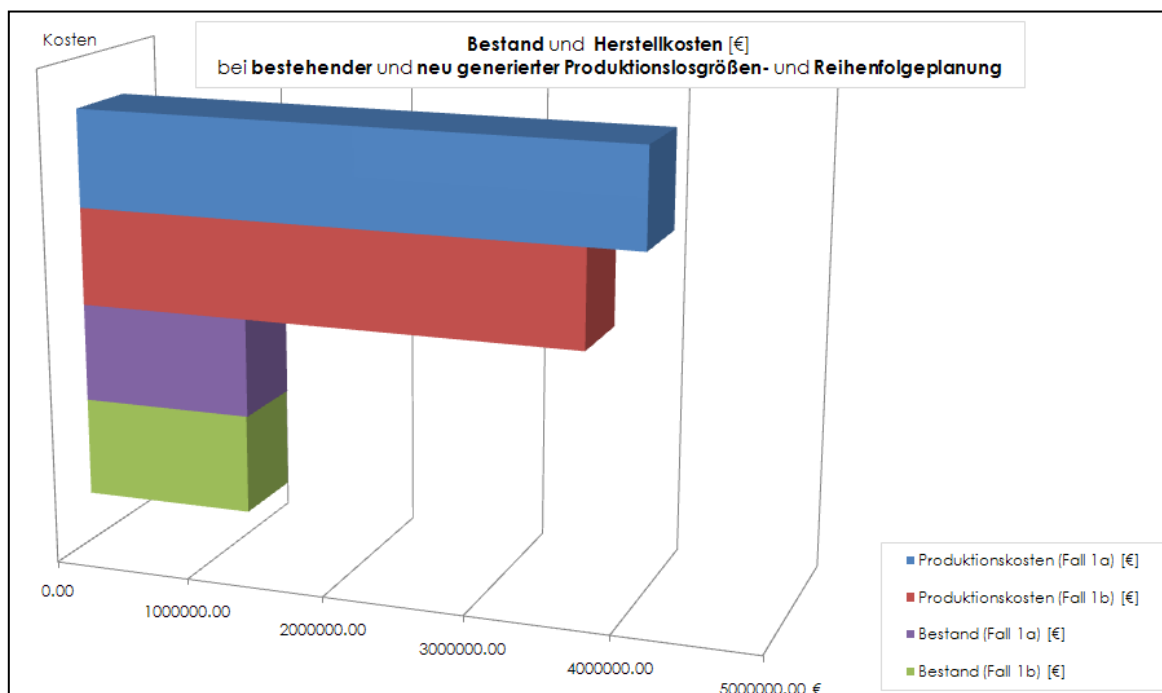


Abbildung 124: Bestand und Produktionskosten [€] im Vergleich<sup>735</sup>

<sup>734</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Daran anschließend wurde das Abstimmungsinstrumentarium am auftragsschwachen Monat Oktober 2011 getestet, in welchem die Produktion in der Gießerei an 5 Tagen die Woche zu je 3 Schichten erfolgte. Hierbei wurde die Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung hinsichtlich der konkurrierenden Zielgrößen Auslastung und Termintreue angewandt. Dabei konnte eine Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative ermittelt werden, bei Anwendung derer die Termintreue um 3,42 % im Vergleich zur bestehenden Variante erhöht werden konnte. Die Auslastung der Gießerei konnte dabei um 8,72 % gesteigert werden. Weiters zeichnete sich auch ein positiver Trend auf die anderen Zielgrößen wie beispielsweise die während der Produktion anfallenden Kosten ab. So konnten diese um 913.037,03 € gesenkt werden. Der Bestand, d.h. die gesamte Menge auf Lager liegender Aufträge in Tonnen stieg um insgesamt 821,25 Tonnen an, was zu einer Erhöhung der Lagerkosten von insgesamt 11.036,65 € führte.

Die in den Abbildung 125 aufgezeigten Verbesserungen spiegeln das Potenzial der neu generierten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative wieder. Die aus der Anwendung des Abstimmungsinstrumentariums resultierenden Einsparungs- und Verbesserungspotenziale, wie beispielsweise die Senkung der Herstellkosten sowie die Verringerung der Durchlaufzeit, überwiegen deutlich im Vergleich zum Anstieg des Bestands und der damit verbundenen Lagerkostenerhöhung, und sprechen klar für die neu gefundene Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative im Vergleich zum bestehenden Produktionsprogramm.

| <b>VERBESSERUNGSPOTENZIALE II</b> |             |                   |                |
|-----------------------------------|-------------|-------------------|----------------|
| Termintreue [%]                   | Bestand [t] | Durchlaufzeit [h] | Auslastung [%] |
| 3.42                              | 821.25      | -216.11           | 8.72           |
| Produktionskosten [€]             |             |                   |                |
| -913037.03                        |             |                   |                |
| Prüfkosten [€]                    |             | Lagerkosten [€]   |                |
| 0.00                              |             | 11036.65          |                |

Abbildung 125: Verbesserungspotenzial II für Oktober 2011<sup>736</sup>

In Abbildung 126 sind die aus den beiden Produktionslosgrößen- und Reihenfolgevarianten resultierenden Termintreuen und Auslastungen in % nochmals gegenübergestellt.

<sup>735</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>736</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

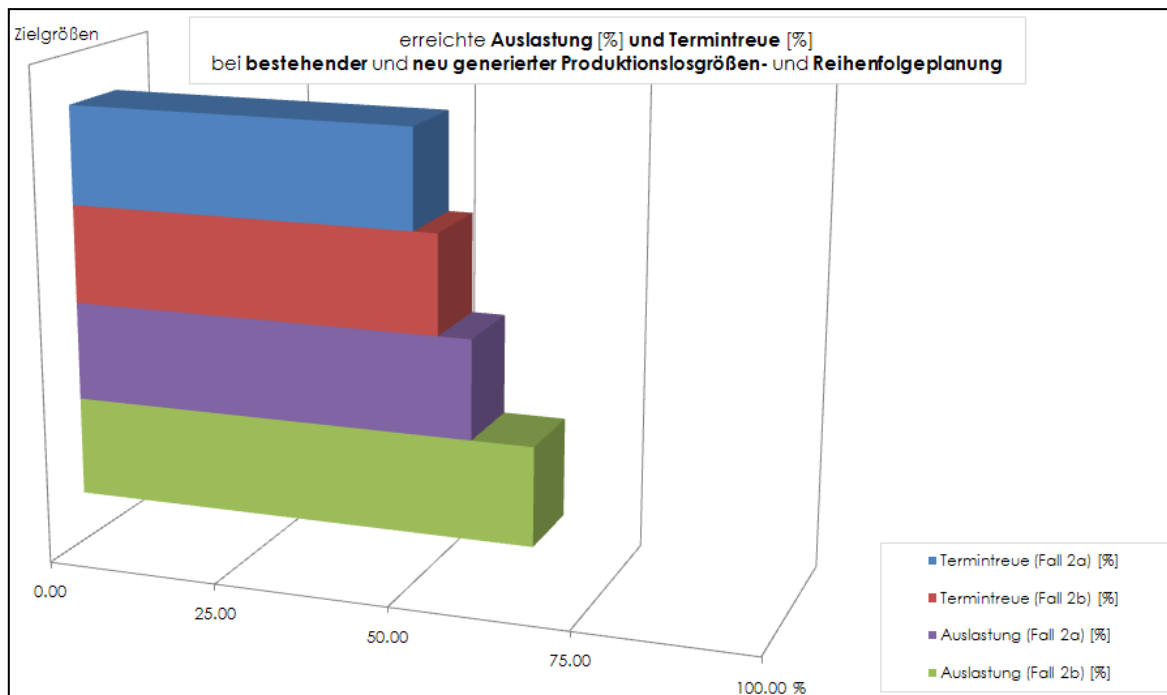


Abbildung 126: Termintreue und Auslastung [%] im Vergleich<sup>737</sup>

Anzumerken ist, dass je besser die Planung bereits durch das in Abschnitt 5.3.1.3.2 vorgestellte Excel-Makro zur Produktionsprogrammplanung vorgenommen werden konnte, desto größer sind auch die aus der Anwendung des Abstimmungsalgorithmus resultierenden Verbesserungen. Beachtung hat die Tatsache zu finden, dass bei der Abstimmung hinsichtlich einer Zielgröße weitaus größere Verbesserungen erzielt werden können. Würde man beispielsweise nur die Zielgröße der Termintreue am Fallbeispiel Oktober 2011 fokussieren, so erreicht diese nach der Abstimmung im Durchschnitt ca. 60-65 %. Jedoch gerade hierbei liegt der Vorteil des Abstimmungsinstrumentariums, welche eine bessere Lösung aus mehreren (teils konkurrierenden Zielgrößen) sucht und nicht die Optimierung einer einzelnen Zielgröße oder einer reinen Kostenbetrachtung anstrebt.

#### 5.4.1.2 Beurteilung des Bewertungsinstrumentariums

Hierbei erfolgt nun die Beurteilung des Bewertungsinstrumentariums. Im Fokus der Betrachtung stehen dabei die durch die Anwendung des Werkzeugs erreichten Ergebnisse und Schlussfolgerungen.

Zunächst wurde das Bewertungsinstrumentarium auf die in Abschnitt 5.3.4 beschriebenen Fälle 1a und 1b angewandt um die durch den Abstimmungsprozess generierte Produktionslosgrößen- und Reihenfolgevariante (Fall 1b) der bestehenden Variante (Fall 1a) gegenüberstellen zu können, um so einerseits die Frage des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen und die während der Produktion anfallenden Kosten

<sup>737</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

beantworten zu können und andererseits auch festzustellen, welche Auswirkungen die neu generierte Alternative auf die Logistikleistung und -kosten der Gießerei im Vergleich zur bestehenden Variante hat.

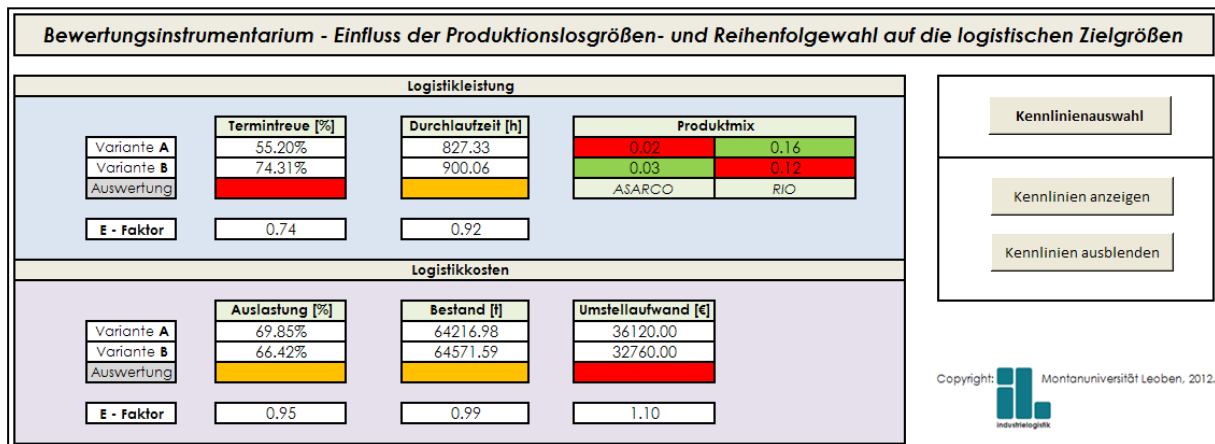


Abbildung 127: Ergebnis des Bewertungsinstrumentariums für März 2011<sup>738</sup>

Wie in Abbildung 127 ersichtlich, kann festgestellt werden, dass die neu generierte Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative im Vergleich zur bestehenden Variante auf die Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und den Produktmix für die Aggregatseinheit ASARCO \_Gießofen\_5\_Gießanlage\_3\_Gießofen\_6\_Gießanlage\_4 einen eher geringen Einfluss ausübt, da die einzelnen Einflussfaktoren einen Wert nahe 1 annehmen bzw. die  $V_x$ -Faktoren der neuen und alten Variante fast ident sind. Hingegen die Termintreue, der Produktmix für die Aggregatseinheit RIO\_1\_4\_GA\_1\_GA\_2 sowie der Umstellaufwand werden durch die neu generierte Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung im Vergleich zur bestehenden stärker beeinflusst, was in den Einflussfaktoren  $E_{ABT} = 0,74$  für die Termintreue (Verschlechterung dieser),  $E_{ABU} = 1,10$  für den Aufwand bzw. die Anzahl an Umstellungen (Anstieg des Umstellaufwandes) und dem Variationskoeffizienten  $V_x = 0,16$  (Verbesserung) ersichtlich ist.

Anzumerken sei an dieser Stelle, dass die Verringerung der Leerkosten und die erreichte Reduzierung der gesamten Herstellkosten um 10,07% gleichzeitig aber auch zu einer erheblichen Verschlechterung der Termintreue führt, hingegen verbessern bzw. verschlechtern sich die anderen Zielgrößen im Vergleich dazu kaum.

In der nachfolgenden Abbildung 128 werden die bei der Produktion anfallenden Herstellkosten in € über die Durchlaufzeit (in Stunden) der neu generierten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative (Variante A in Abbildung 128) der bestehenden Variante (Variante B in Abbildung 128) gegenübergestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die Produktion mit der neu generierten Produktionslosgröße und Reihenfolge in geringeren Herstellkosten im Vergleich zum bestehenden Produktionsprogramm resultiert.

<sup>738</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

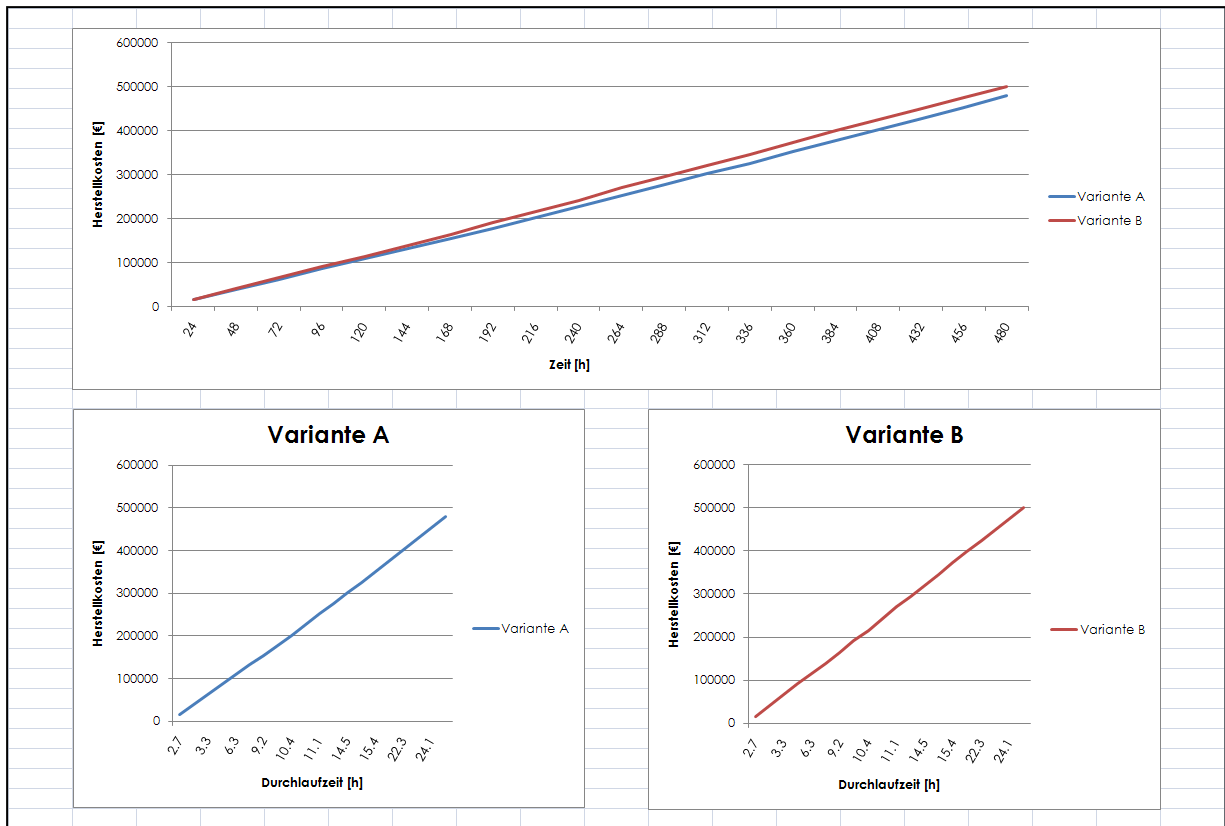


Abbildung 128: Kennlinien Produktionskosten für März 2011<sup>739</sup>

Auch die für den Monat Oktober 2011 neu generierte Produktionslosgrößen- und Reihenfolgevariante wurde durch Zuhilfenahme des Bewertungsinstrumentariums mit der bestehenden Variante verglichen, um deren Einfluss sowie die daraus resultierenden Auswirkungen bewerten und darstellen zu können (siehe dazu Abbildung 129).

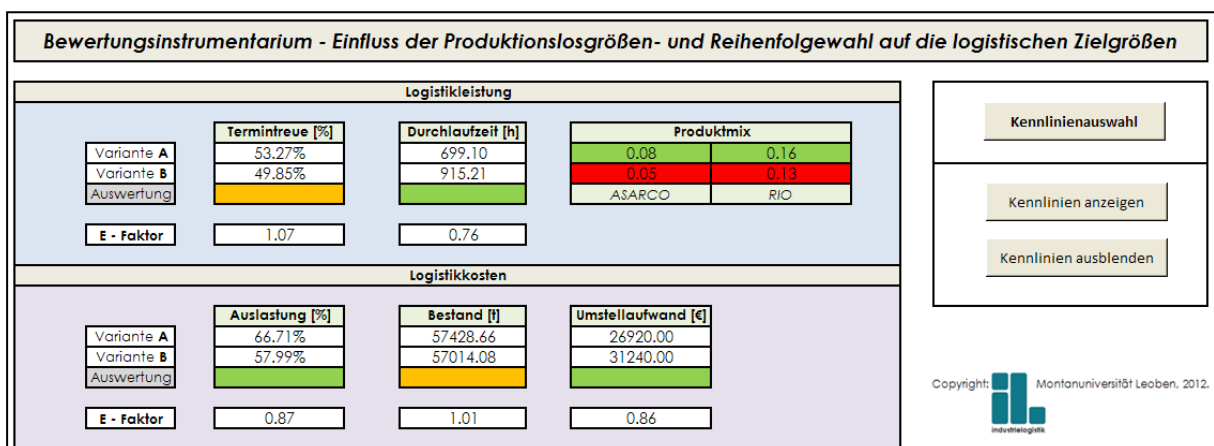


Abbildung 129: Ergebnis des Bewertungsinstrumentariums für Oktober 2011<sup>740</sup>

Dabei kann festgestellt werden, dass die neu generierte Produktionslosgröße und Reihenfolge im Vergleich zum bestehenden Produktionsprogramm einen geringen bzw. kaum Einfluss auf die Zielgröße der Termintreue ausübt, was durch einen Einflussfaktor  $E_{ABT}$  von 1,07 ausgedrückt

<sup>739</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>740</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.



wird. Da der  $E_{ABT}$ -Faktor einen Wert größer 1 annimmt, kann auf eine positive Beeinflussung der Termintreue durch die gewählte Produktionslosgrößen- und Reihenfolgealternative geschlossen werden, was auch in einer Steigerung der Termintreue auf 53,27 % resultiert. Hingegen übt die neu generierte Produktionslosgrößen- und Reihenfolgevariante (Variante A in Abbildung 129) im Vergleich zur bestehenden (Variante B in Abbildung 129) einen erheblichen Einfluss auf die Zielgrößen Durchlaufzeit, Auslastung und Umstellaufwand aus, was wiederum an den Werten der einzelnen Einflussfaktoren  $E_{ABD} = 0,76$  für die Durchlaufzeit,  $E_{ABA} = 0,87$  für die Auslastung und  $E_{ABU} = 0,86$  für den Aufwand bzw. die Anzahl an Umstellungen ersichtlich ist. Da diese einen Wert  $< 1$  annehmen, kann wiederum laut Definition (siehe dazu S. 164 ff.) auf eine positive Beeinflussung derer geschlossen werden. Auch der Produktmix kann bei Anwendung der neuen Variante mit geringeren Herstellkosten (durch die eintretende Stückkostendegression) produziert werden, was durch die einzelnen  $V_x$ -Faktoren je Aggregat dargestellt werden kann ( $V_x = 0,08$  für die Aggregatseinheit ASARCO\_Gießofen\_5\_Gießanlage\_3\_Gießofen\_6\_Gießanlage\_4 und  $V_x = 0,16$  für die Aggregatseinheit RIO\_1\_4\_GA\_1\_2). Der Bestand wird im vorliegenden Fallbeispiel durch die Produktionslosgröße und Reihenfolge unwesentlich beeinflusst, was im  $E_{ABB}$ -Faktor von 1,01 ersichtlich ist.

Abschließend ist der Kennlinienverlauf für die Zielgröße der Termintreue der neu generierten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgevariante (Variante A in Abbildung 130) sowie der bestehenden Variante (Variante B in Abbildung 130) dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die Termintreue bei Variante A weniger stark sinkt im Vergleich zu B, was in einer insgesamt höheren Termintreue bei Verwendung der neu generierten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung resultiert.

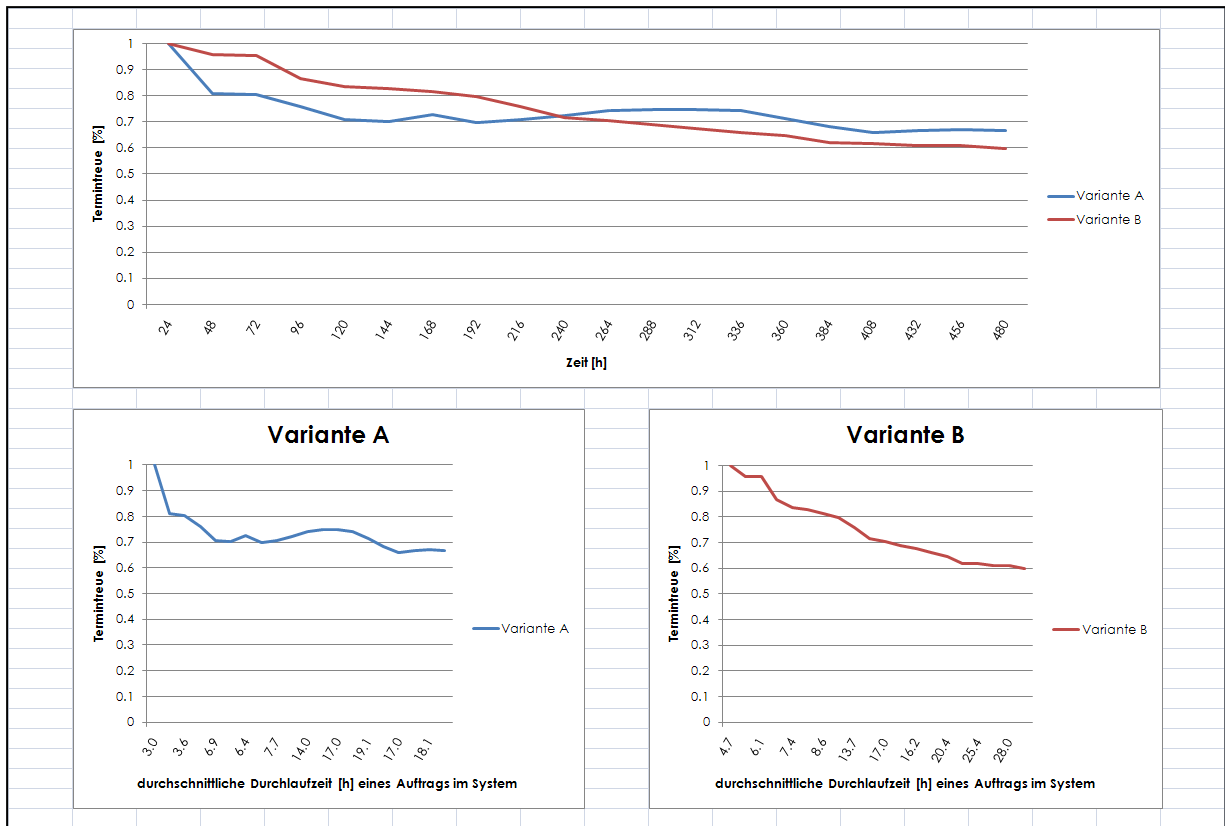


Abbildung 130: Kennlinien Termintreue für Oktober 2011<sup>741</sup>

Für den Einsatz in der betrieblichen Praxis konnten somit der Einfluss und die Auswirkungen einer gewählten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgevariante im Vergleich zu einer bestehenden bzw. anderen Variante (bei Fokussierung ausgewählter Zielgrößen) auf die Logistikleistung und -kosten in der Gießerei aufgezeigt und den dort verantwortlichen Personen eine Entscheidungsunterstützung bei der Produktionsplanung und -steuerung gegeben werden. Auswirkungen lassen sich somit frühzeitig abschätzen, wodurch es möglich ist, rechtzeitig und rasch auf (unvorhergesehene bzw. ungeplante) Ereignisse zu reagieren.

## 5.4.2 Überprüfung der Basisgleichung zur Beschreibung logistischer Kennlinien

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob die entwickelte Basisgleichung bzw. der vorgestellte Ansatz aus Abschnitt 3.3.3.1.1 eine bessere Annäherung berechneter Kennlinien an die realen Kennlinienverläufe im Vergleich zu dem von Nyhuis und Wiendahl entwickelten Ansatz bietet. Um dies beantworten zu können, wurden die Simulationsergebnisse<sup>742</sup> für die mittlere kumulierte Leistung sowohl mit den berechneten Werten der mittleren kumulierten Leistung nach Nyhuis und Wiendahl als auch mit jenen auf der Basis der Sigmoid-

<sup>741</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>742</sup> Siehe dazu ausführlich Excel-Datei Datensätze\_Kennlinienvergleich: Tabellen: März\_2011, April\_2011, Oktober\_2011 und November\_2011 auf der beigelegten CD.

Funktion durch Berechnung der mittleren Abweichung, der mittleren quadratischen Abweichung sowie des mittleren quadratischen Fehlers verglichen.<sup>743</sup>

Im Nachfolgenden werden exemplarisch vier durchgeführte Experimente (für die Monate März, April, Oktober und November 2011)<sup>744</sup> erläutert, wobei analog dazu, die daraus resultierenden Ergebnisse in allen durchgeführten Experimenten<sup>745</sup> ersichtlich sind bzw. aufgezeigt werden konnten:

Zur Überprüfung der Kennlinienansätze wurde zunächst jeweils die *mittlere Abweichung*  $A_m$  der berechneten Kennlinienwerte der Sigmoid-Funktion und auf Basis von Nyhuis und Wien-dahl zu den Simulationenwerten berechnet (siehe dazu Gleichung 93).

$$A_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i,s} - x_{i,b})^2 \quad (\text{Gleichung 93})$$

wobei

$A_m$  mittlere Abweichung

$n$  Anzahl der Messwerte je Kennlinie

$x_{i,s}$  Wert der simulierten Kennlinie

$x_{i,b}$  Wert der berechneten Kennlinie

Weiters wurde, um eine Aussage darüber zu erhalten, welchen zufälligen Abweichungen die Werte der berechneten Kennlinien von jenen der simulierten Kennlinie unterliegen, die *mittlere quadratische Abweichung*  $\sigma_A$  ermittelt (siehe dazu Gleichung 94).

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{i,s} - x_{i,b})^2} \quad (\text{Gleichung 94})$$

wobei

$\sigma_A$  mittlere quadratische Abweichung

$n$  Anzahl der Messwerte je Kennlinie

$x_{i,s}$  Wert der simulierten Kennlinie

$x_{i,b}$  Wert der berechneten Kennlinie

Für die mittlere Abweichung ergibt sich daraus ein *mittlerer quadratischer Fehler* (auch Standardabweichung genannt), welcher zur Beurteilung der Anpassung der berechneten an die simulierten Kennlinien herangezogen werden kann (siehe dazu Gleichung 95).

<sup>743</sup> Vgl. Eichler et al. (2006), S. 24 ff.

<sup>744</sup> Siehe dazu ausführlich Excel-Dateien Überprüfung\_Kennlinienansätze\_März-Oktober 2011 auf der beigelegten CD.

<sup>745</sup> Experimente wurden für alle Monate im Jahr 2011 durchgeführt.

$$\sigma_{MA} = \frac{\sigma_A}{\sqrt{n}} \quad (\text{Gleichung 95})$$

wobei

$\sigma_{MA}$  mittlerer quadratischer Fehler (Standardabweichung)

$\sigma_A$  mittlere quadratische Abweichung

$n$  Anzahl der Messwerte je Kennlinie

Im Zuge der Kennlinienüberprüfung wurden zunächst zwei Monate ausgewählt, in welchen an 7 Tagen der Woche zu je drei Schichten produziert wurde (siehe dazu Vollbetrieb in Abschnitt 5.3.2). Dabei konnte aufgezeigt werden, dass die mittleren quadratischen Fehler der Kennlinienwerte auf Basis der Sigmoid-Funktion zu den simulierten Kennlinienwerten immer kleiner sind, als jene der ursprünglichen Kennlinien von Nyhuis und Wiendahl (bei einem gewählten  $C = \frac{1}{4}$ ). Dies liegt darin begründet, dass Nyhuis und Wiendahl bei der Herleitung ihrer Basisgleichung zur Beschreibung der berechneten Kennlinien das in der  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion enthaltene  $C$  sowie den Streckfaktor  $\alpha$  aufgrund von Simulationsstudien und der daraus resultierenden Annahme, dass die bestandsbedingten Leistungsverluste im Allgemeinen meist 6% betragen, festgelegt haben. Jedoch sind die von Nyhuis und Wiendahl beschriebenen Zusammenhänge nur in den von ihnen betrachteten Produktionssystemen gültig und somit nicht bzw. nur durch aufwendige Anpassungen auf andere Produktionssysteme übertrag- bzw. anwendbar.<sup>746</sup> Der von Nyhuis und Wiendahl erläuterte, einfache Zusammenhang zwischen der mittleren Leistung und des mittleren Bestands (siehe dazu Gleichungen 22 und 23) besitzt somit keine allgemeine Gültigkeit.

Im Gegensatz zu der von Nyhuis und Wiendahl verwendeten  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion (mit  $C = \frac{1}{4}$ ) lässt sich der entwickelte Ansatz aus Abschnitt 3.3.3.1.1 durch vergleichsweise wenige Anpassungen auf jegliche Produktionssysteme und somit auch auf die von Nyhuis und Wiendahl beschriebenen Produktionssysteme (siehe dazu ebenfalls Abschnitt 3.3.3.1.1) übertragen.

In den durchgeführten Experimenten war für die Bestimmung der notwendigen Leistungs- und Bestandsfaktoren  $\sigma_L$  und  $\sigma_B$  (siehe Gleichungen 41 und 43) zur Berechnung der Leistungs- und Bestandskennlinienwerte auf Basis der Sigmoid-Funktion nur die Bestimmung eines tatsächlichen bzw. simulierten Leistungs- und Bestandswertes  $L_{\text{ist}}$  und  $B_{\text{ist}}$  zum Zeitpunkt  $t_{\text{ist}}$  sowie die Angabe der maximalen Leistung  $L_{\text{max}}$  und des maximalen Bestands  $B_{\text{max}}$ , welche meist bekannte Größen im Unternehmen darstellen, notwendig. Beachtung hat die Tatsache zu finden, dass die Qualität bzw. Güte der Anpassung mittels Sigmoid-Funktion wesentlich durch die Bestimmung bzw. Messung von  $L_{\text{ist}}$  und  $B_{\text{ist}}$  beeinflusst wird. Als Empfehlung für die Festlegung dieser Werte kann die Aussage getätigt werden, dass sich zur Bestimmung dieser Größen in der Regel Werte nahe dem bzw. knapp vor dem Maximum eignen (in den vorliegen-

<sup>746</sup> Siehe dazu ausführlich Nyhuis et al. (2009), S. 91 ff., S. 101 ff. sowie S. 137 ff.

den Experimenten wurden  $L_{ist}$  und  $B_{ist}$  zum Zeitpunkt  $t_{ist} = 24$  gewählt), wobei dies jedoch nur eine Empfehlung darstellt und nicht als generell gültig angesehen werden darf.

Weiters wurde im Zuge der durchgeführten Experimente auch versucht, die von Nyhuis und Wiendahl vorgeschlagene Basisgleichung an die simulierten Kennlinien anzupassen. Dabei hat sich die Veränderung des  $C$ -Faktors als die „wirksamste Vorgehensweise“ zur Anpassung an die Simulationswerte herausgestellt. So wurde die Basisfunktion von Nyhuis und Wiendahl auch mit den Werten  $C = \frac{1}{2}$  und  $C = 1$  getestet. Wie in Abbildung 131 und 132 ersichtlich, konnten bei einer Festlegung von  $C = 1$  der geringste mittlere quadratische Fehler erzielt werden, jedoch die ursprüngliche von Nyhuis und Wiendahl vorgeschlagene Basisgleichung mit  $C = \frac{1}{4}$  erwies sich als unbrauchbar zur Beschreibung des Leistungsverhaltens dieses Produktionssystems. Folglich kann auch die von Nyhuis und Wiendahl angenommene Tatsache, dass die bestandsbedingten Leistungsverluste meist 6% betragen zumindest für dieses bzw. für hybride Produktionssysteme nicht bestätigt werden. So wurde bei den Monaten März und April 2011 ein mittlerer quadratischer Fehler der Sigmoid-Funktion von den Simulationswerten für die mittlere Leistung von 1087,88 und 1075,99 erzielt. Die mittleren quadratischen Fehler mit der von Nyhuis und Wiendahl ursprünglich vorgeschlagenen Gleichung (mit  $C = \frac{1}{4}$ ) für die mittlere Leistung brachten die Ergebnisse von 5777,74 und 5702,27 zu den simulierten Leistungswerten, was ein eindeutig schlechteres Ergebnis zur Sigmoid-Funktion darstellt. Auch die erreichten Werte für  $C = \frac{1}{2}$  von 2443,07 und 2427,16 waren noch immer schlechter im Vergleich zur Sigmoid-Funktion. Für  $C = 1$  hingegen konnten geringere quadratische Fehler (75,64 und 79,70) im Vergleich zur Sigmoid-Funktion erzielt werden.

|   |
|---|
| <b>Experiment 1: März 2011; Vollbetrieb</b>               |
| Fehlerabschätzung: <b>Sigmoid Funktion</b>                |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>1087.883961</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1/4</b> |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>5777.738565</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1/2</b> |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>2443.065397</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1</b>   |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>75.64129707</b>  |

Abbildung 131: Ergebnis Experiment 1 - Kennlinienansätze<sup>747</sup>

<sup>747</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

|   |
|---|
| <b>Experiment 2: April 2011; Vollbetrieb</b>              |
| Fehlerabschätzung: <b>Sigmoid Funktion</b>                |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>1075.985959</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1/4</b> |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>5702.274861</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1/2</b> |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>2427.156917</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1</b>   |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>79.69971802</b>  |

Abbildung 132: Ergebnis Experiment 2 - Kennlinienansätze<sup>748</sup>

Im Anschluss daran wurden zwei weitere Experimente für die Monate Oktober und November 2011 durchgeführt, an welchen nur an 5 Tagen die Woche zu je 3 Schichten (Normalbetrieb; siehe dazu Abschnitt 5.3.2) produziert wurde. Auch hier wurden analog zum Vollbetrieb dieselben Anpassungen sowohl betreffend die Sigmoid-Funktion als auch hinsichtlich der Funktion von Nyhuis und Wiendahl vorgenommen.

Hierbei konnte ebenfalls festgestellt werden, dass die Sigmoid-Funktion verglichen mit den Simulationen der mittleren Leistung geringere mittlere quadratische Fehler zum ursprünglichen Ansatz von Nyhuis und Wiendahl aufweist. So ergeben sich für die Monate Oktober und November 2011 die Standardabweichungen zwischen den Werten der Sigmoid-Funktion und den Simulationen von 611,21 und 641,15. Für den Ansatz nach Nyhuis und Wiendahl wurden die Werte bei  $C = \frac{1}{4}$  von 5283,35 und 5313,30, bei  $C = \frac{1}{2}$  von 1921,50 und 1909,13 und für  $C = 1$  von 10,11 und 8,01 (siehe dazu Abbildungen 133 und 134) ermittelt.

Anzumerken ist, dass sowohl die Kennlinienwerte auf Basis der Sigmoid-Funktion als auch jene der  $C_{\text{Norm}}$ -Funktion bei Normalbetrieb geringere Standardabweichungen zu den Simulationsergebnissen aufweisen als bei Vollbetrieb, was darin begründet ist, dass bei Normalbetrieb ein „regelmäßigeres“ Produktionsverhalten vorausgesetzt werden kann und die daraus resultierenden Daten „einfacher“ angepasst werden können.

<sup>748</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

|   |
|---|
| <b>Experiment 3: Oktober 2011; Normalbetrieb</b>          |
| Fehlerabschätzung: <b>Sigmoid Funktion</b>                |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>611.2121635</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1/4</b> |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>5383.346785</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1/2</b> |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>1921.490516</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1</b>   |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>10.11385048</b>  |

Abbildung 133: Ergebnis Experiment 3 - Kennlinienansätze<sup>749</sup>

|   |
|---|
| <b>Experiment 4: November 2011; Normalbetrieb</b>         |
| Fehlerabschätzung: <b>Sigmoid Funktion</b>                |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>641.1524537</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1/4</b> |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>5313.297394</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1/2</b> |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>1909.134487</b>  |
| Fehlerabschätzung: <b>Nyhuis und Wiendahl mit C = 1</b>   |
| <b>mittlere kumulierte Gesamtleistung [t/h]</b>           |
| mittlere STDEV Abweichung                                 |
| <b>8.009139781</b>  |

Abbildung 134: Ergebnis Experiment 4 - Kennlinienansätze<sup>750</sup>

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass sich die Sigmoid-Funktion durch ein geringeres Maß an Anpassungen, im Vergleich zu der von Nyhuis und Wiendahl ursprünglich verwendeten  $C_{Norm}$ -Funktion, sowohl zur Beschreibung der von Nyhuis und Wiendahl herangezogenen Produktionssysteme als auch für andere, komplexere Produktionssysteme eignet und somit einen praxistauglicheren Ansatz darstellt.

Jedoch für das Verhalten des vorliegenden Produktionssystems, liefert die Anpassung mittels einer Polynomregression 2. Ordnung die kleinste quadratische Fehlerabweichung der berechneten Werte an die Simulationsdaten für alle getesteten Monate (siehe dazu Abbildung

<sup>749</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>750</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

135 für Monat März 2011 sowie Anhang F)<sup>751</sup> und stellt somit eindeutig den besten Ansatz zur Beschreibung des Leistungsverhaltens eines hybriden Produktionssystems bzw. die beste Anpassung der berechneten Kennlinien an die simulierten Werte dar. So wurde beispielhaft für den Monat März 2011 ein mittlerer quadratischer Fehler von 14,81 im Vergleich zu 1087,88 (Sigmoid-Funktion) und 75,64 ( $C_{\text{Norm}}$ -Funktion bei  $C = 1$ ) erzielt (siehe dazu mittlere STEDV Abweichung von Experiment 1 in Abbildung 131), für den Monat November 2011 beispielsweise konnte ein mittlerer quadratischer Fehler von 5,15 im Vergleich zu 641,15 (Sigmoid-Funktion) und 8,01 ( $C_{\text{Norm}}$ -Funktion bei  $C = 1$ ) ermittelt werden (siehe dazu mittlere STEDV Abweichung von Experiment 4 in Abbildung 134).

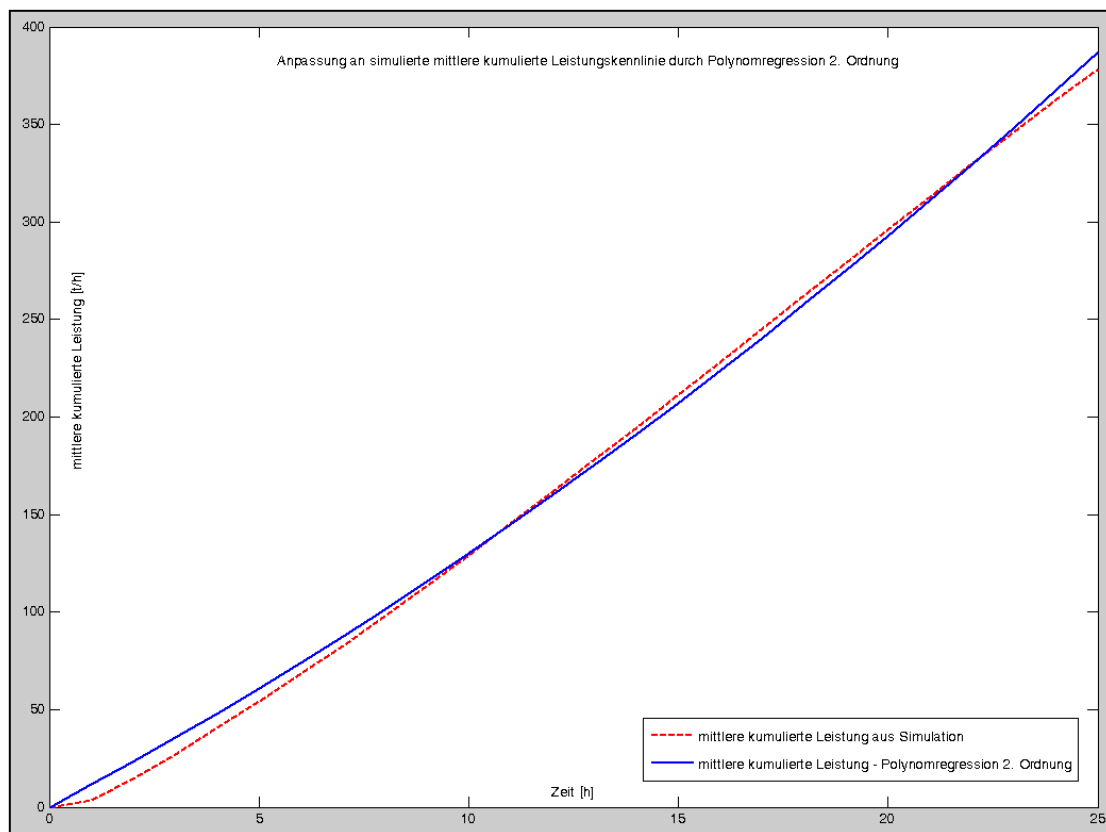


Abbildung 135: Anpassung durch Polynomregression 2. Ordnung<sup>752</sup>

### 5.4.3 Beurteilung der Adaptierbarkeit der Modelle

In diesem Unterkapitel wird die Adaptierbarkeit, d.h. die Übertragung der entwickelten Modelle auf andere Produktionssysteme beurteilt.

Das entwickelte Bewertungsinstrumentarium ermöglicht die Beantwortung der wesentlichen Fragestellungen:

<sup>751</sup> Siehe dazu Anhang F, S. 299 f.

<sup>752</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.



- Welchen Einfluss und welche Auswirkungen eine gewählte Produktionslosgröße und Reihenfolge auf die logistischen Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeit, Bestand und Auslastung ausübt,
- inwiefern sich diese zur Realisierung des zu erzeugenden Produktmixes je Aggregat eignen,
- sowie dem daraus resultierenden Umstellenaufwand.

Aufgrund der Tatsache, dass dem entwickelten Modell allgemein gültige Bewertungsparameter „hinterlegt“ sind, können die oben angeführten Fragestellungen nicht nur für ein hybrides Produktionssystem beantwortet werden, sondern für jedes beliebige Produktionssystem. Das Bewertungsinstrumentarium stellt somit ein „allgemein gültiges Werkzeug“ zur Beurteilung des Losgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf die Logistikleistung und -kosten eines Produktionssystems dar, welches für die Anwendung auf andere Produktionssysteme keine bzw. kaum Anpassungen benötigt.

Die Anwendung des 3-Phasen-Konzepts und des darin enthaltenen Abstimmungsalgorithmus auf andere Produktionssysteme setzt die Anpassung der Zielfunktionen sowie der Nebenbedingungen an die im betrachteten Produktionssystem herrschenden Gegebenheiten und Bedingungen voraus, um die Fragestellung, wie die Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung zu erfolgen hat um eine verbesserte Abstimmung hinsichtlich einer oder mehrerer Zielgrößen zu erhalten, beantworten zu können. Wird dies nicht durchgeführt, kann keine gültige Lösung erzielt werden. Jedoch sei angemerkt, dass der Algorithmus an sich auf jedes beliebige Produktionssystem angewandt werden kann, um eine Verbesserung hinsichtlich der Abstimmung der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die Zielgrößen der Logistikleistung und -kosten zu erzielen. Durch die Umsetzung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung in Form einer Simulation und mittels Visual Basic konnte eine einfach anwendbare Vorgehensweise für den Einsatz im betrieblichen Alltag geschaffen werden, welche in einem vertretbaren Rechenaufwand die mehrstufige Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung in einem hybriden Produktionssystem unter Berücksichtigung sowohl produktionslogistischer als auch kostenspezifischer Aspekte (also aller tatsächlich während der Produktion anfallenden Kosten) ermöglicht. Damit konnte den Kritikpunkten der bestehenden Verfahren zur Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung (siehe dazu Abschnitt 3.4.3) genüge getan werden, indem eine Möglichkeit zur Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung geschaffen wurde, welche eine für den betrieblichen Alltag anwenderfreundliche und in einem vertretbaren Zeitaufwand realisierbare Planung unter Berücksichtigung aller Aspekte realisiert. Aufgrund der Tatsache, dass das Abstimmungsinstrumentarium auf ein durch das VBA-Skript zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung generiertes Produktionsprogramm (siehe Abschnitt 5.3.1.3.2), welches die vom Unternehmen gewünschte und auch geforderte nachvollziehbare und transparente Planung unter Berücksichtigung aller geltenden Restriktionen ermöglicht,

aufbaut, kann die Verbesserung eines bereits sehr guten Produktionslosgrößen- und Reihenfolgevorschlages in „zwei Stufen“ realisiert werden. Weiters können die Auswirkungen und der Einfluss der Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die in Abschnitt 4.1 definierten Zielgrößen aufgezeigt und bewertet werden.

Abschließend sind nochmals die wesentlichen Ergebnisse und Nutzen, welche durch die Anwendung der entwickelten Modelle in der betrieblichen Praxis erzielt werden können, zusammengefasst:

| <b>Ergebnisse:</b>  | <b>Nutzen:</b>  |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ automatisierte Losgrößen- und Reihenfolgeplanung mit veränderbaren Kriterien</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ einfaches Tool zur flexiblen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Bewertung und Darstellung des Einflusses eines festgelegten Produktionsprogramms sowie dessen Auswirkungen</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Einfluss und Auswirkungen auf einen Blick erkennbar</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Abstimmung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung sowohl auf logistische Zielgrößen als auch kostenspezifische Aspekte</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ rasche Anpassung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung an veränderliche Rahmenbedingungen (Unternehmensziel, Markt) möglich</li> </ul> |

**Abbildung 136: Ergebnisse und Nutzen für die betriebliche Praxis<sup>753</sup>**

In Kapitel 6 werden nun die abschließenden Betrachtungen getätigt sowie ein Resümee aus dieser Dissertation gezogen.

<sup>753</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

## 6 Abschließende Betrachtungen und Resümee

Im letzten Kapitel dieser Dissertation werden eine Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte sowie ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben.

### 6.1 Zusammenfassung

Aufgrund der fortschreitenden Globalisierung und dem starken Konkurrenzkampf am Markt ist die Notwendigkeit einer flexiblen, auf die Nachfrage ausgerichteten Produktion, um die individuellen Kundenbedürfnisse zu befriedigen und sich somit durch Differenzierung gegenüber dem Wettbewerb abzuheben und damit eine möglichst starke Kundenbindung zu schaffen, eine notwendige Voraussetzung, um langfristig den Unternehmenserfolg garantieren zu können. Diese Tatsache stellt die Produktionsplanung und -steuerung eines Unternehmens vor große Herausforderungen: Die individuellen Kundenbedürfnisse und -wünsche, welche es möglichst wirtschaftlich zu erfüllen gilt, resultieren meist in einem Anstieg der herzustellenden Varianten, was wiederum zu einem Anstieg der Komplexität in der Planung und Steuerung von Produktionssystemen führt. Ein Ansatzpunkt, welcher einen entscheidenden Beitrag zur Beherrschung dieser Problematik liefert, wird in der hier vorliegenden Arbeit vorgestellt. Die geeignete Bestimmung der Produktionslosgröße und Reihenfolge kann neben der Erreichung einer wirtschaftlichen Produktion entscheidend zur Verbesserung der logistischen Leistungsfähigkeit eines Arbeitssystems beitragen. Im Laufe der Zeit wurden viele Verfahren zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung entwickelt, welche jedoch meist nur kostenspezifische Aspekte und/oder einzelne logistische Zielgrößen fokussieren. Eine Betrachtung des Einflusses der Produktionslosgröße und Reihenfolge auf monetäre Faktoren und logistische Zielgrößen gleichermaßen fand bis dato kaum statt. Ebenso existierte keine Darstellung und Bewertung wie und in welchem Ausmaß die logistischen Zielgrößen einer Produktion durch die gewählte Produktionslosgröße und Reihenfolge beeinflusst werden. An dieser Stelle setzt die vorliegende Dissertation an. Das Ziel dieser Arbeit bestand zunächst darin, ein Modell zu entwickeln, welches die Abbildung und Bewertung des Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf die Logistikleistung und -kosten eines Produktionssystems ermöglicht. Das in dieser Arbeit entwickelte Modell realisiert neben der Darstellung und Bewertung dessen, weiter die Übertragung des Produktionslosgrößen- und Reihenfolgeeinflusses auf die bestehenden Ansätze der Kennlinientheorie, wodurch ein wesentlicher Beitrag in der logistischen Forschung erzielt werden konnte. Zudem liegt der Fokus dieser Arbeit auf hybriden Produktionssystemen, welche die Schnittstelle zwischen der Prozess- und Fertigungsindustrie bilden und sowohl Prozesse der Stoffumwandlung als auch der Stoffumformung beinhalten und bis dato in der logistischen Disziplin als wenig erforschtes Gebiet galten. Neben den in dieser Arbeit vorgenomme-

nen Untersuchungen hinsichtlich der Systemcharakteristika und der Identifikation der wesentlichen Einflussparameter auf die Logistikleistung und -kosten eines hybriden Produktionssystems sowie der Definition eines „Zielsystems der Produktionslogistik“ für die Hybridfertigung, konnten zusätzlich wesentliche Erkenntnisse über die produktionslogistischen Interdependenzen zwischen den Stoffumwandlungs- und Stoffumformungsprozessen gewonnen werden. Das in dieser Arbeit entwickelte Bewertungsinstrumentarium, mit Hilfe dessen der Einfluss der Produktionslosgröße und Reihenfolge sowie deren Auswirkungen auf die bestehenden Ansätze der Kennlinientheorie übertragen werden können, stellt ein einfaches und zugleich nützliches Werkzeug für den Einsatz in der betrieblichen Praxis dar. Den logistiknahen Vertretern wird dadurch im betrieblichen Alltag die Möglichkeit geboten, auf einen Blick den Einfluss und die Auswirkungen der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf das Leistungs- und Kostenverhalten ihrer Produktion zu erkennen und Schlussfolgerungen daraus zu ziehen. Des Weiteren wird in dieser Arbeit ein 3-Phasen-Konzept vorgestellt, welches bei der Anwendung des darin enthaltenen Abstimmungsalgorithmus eine Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Abstimmung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf die Logistikleistung und -kosten einer hybriden Fertigung liefert und somit die rasche Anpassung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung auf veränderte Rahmenbedingungen (wie beispielsweise Unternehmensziele, Marktsituationen usw.) ermöglicht. Die Konkretisierung der entwickelten Modelle am Fallbeispiel der Gießerei einer Kupferhütte brachte das Ergebnis, dass durch die Anwendung des 3-Phasen-Konzepts sowohl erhebliche Verbesserungs- als auch große Einsparungspotenziale für das Unternehmen erzielt werden konnten. Mit dieser Dissertation wurden nicht nur wertvolle Werkzeuge zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für die betriebliche Praxis geschaffen, die Erweiterung der bestehenden Ansätze der Kennlinientheorie um den Losgrößen- und Reihenfolgeeinfluss sowie die Ermittlung einer Basisgleichung, welche eine bessere und auch einfachere (und somit praxistauglichere) Anpassung berechneter logistischer Kennlinien an reale Gegebenheiten im Vergleich zu dem von Wiendahl und Nyhuis entwickelten Ansatz verspricht, stellen einen eindeutigen Mehrwert in der logistischen Wissenschaftsdisziplin dar. Ebenso konnte aufgezeigt werden, dass die entwickelten Modelle und Konzepte durch geringe Anpassungen auf andere Produktionssysteme adaptiert bzw. übertragen werden können, womit die Ergebnisse dieser Arbeit in einem breiten Anwendungsfeld in den unterschiedlichsten Industrien Anwendung finden können.

## 6.2 Ausblick

Zum Abschluss wird nun ein Ausblick auf den aus dieser Arbeit resultierenden, zukünftigen Forschungs- und Handlungsbedarf gegeben.

Die in dieser Dissertation entwickelten Modelle und Instrumentarien fokussieren den Bereich der Produktionsplanung und -steuerung eines Unternehmens. Als zukünftiger bzw. weiterfüh-

render Forschungsbedarf ist die Erweiterung bzw. Einbeziehung der bestehenden Modelle im Hinblick auf die der Produktion vorgelagerten Beschaffung bzw. Materialbereitstellung sowie der an die Produktion anschließenden Distribution zu sehen. Durch die Einbindung dieser Schnittstellen könnte zum einen eine Verbesserung in der Abstimmung zwischen der Bestell- und Produktionslosgröße erzielt werden, was zu geringeren Lagerhaltungs- und Kapitalbindungskosten der Vormaterialien sowie in einer effizienteren Materialbestellung und auch -bereitstellung resultieren würde. Zum anderen kann durch die Erweiterung der Modelle auf die nachgelagerte Distribution eine Verbesserung hinsichtlich der Lagerhaltung der Enderzeugnisse durch die Minimierung der auf Lager liegenden Güter erreicht werden, womit ebenfalls eine Senkung der Bestandskosten einhergehen würde. Weiters ist eine Minimierung der Lagerflächen bzw. eine effizientere Nutzung derer realisierbar. Dies ist wiederum gerade aufgrund der Tatsache, dass die in einem hybriden Produktionssystem vorhandenen Güter meist größeren Platzbedarf aufweisen und daher oftmals in der betrieblichen Praxis Engpässe bei der Lagerung der Produkte hervorrufen, für Unternehmen mit hybriden Fertigungsstrukturen von großer Bedeutung.

## Literaturverzeichnis

- Acker, I. J.:** Methoden zur mehrstufigen Ablaufplanung in der Halbleiterindustrie. Dissertation, Universität Hohenheim, 2010.
- Adam, D.:** Produktionsmanagement. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 1997.
- Adam, D.:** Planung und Entscheidung: Modelle - Ziele - Methoden. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 1996.
- Adam, D.; Witte, T.:** Typen betriebswirtschaftlicher Modelle. In: WISU - Das Wirtschaftsstudium, 1976, S. 1-5.
- Almeder, C.:** A hybrid optimization approach for multi-level capacitated lot-sizing problems. In: European Journal of Operational Research, Vol. 200, Issue 2, 2010, S. 599-606.
- Al-Radhi, M.; Heuer, J.:** Total Productive Maintenance. München: Carl Hanser Verlag, 1995.
- Andres, C.; Albarracin, J. M.; Tormo, G.; Vicens, E.; Garcia-Sabater, J. P.:** Group technology in a hybrid flowshop environment: A case study. In: European Journal of Operational Research, Vol. 167, 2004, S. 272-281.
- Appoo, P. M.:** A Practical Method of Implementing the Batch BOM in the Process Industries. In: Production and Inventory Management Journal, Vol. 28, 1987, Heft 2, S. 79-84.
- Arnold, D.; Furmans, K.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.:** Handbuch Logistik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2004.
- Arnold, D.; Furmans, K.; Kuhn, A.; Isermann, H.; Tempelmeier, H.:** Handbuch Logistik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2008.
- Arts, R. H. P. M.; Knapp, G. M.; Mann Jr., L.:** Some aspects of measuring maintenance performance in the process industry. In: Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 4, Nr. 1, 1998, S. 6-11.
- Ashazeri, J.; Selen, W.:** A planning and scheduling model for onsertion in printed circuit board assembly. In: European Journal of Operational Research, Vol. 183, 2006, S. 909-925.
- ASIM-Fachgruppe Simulation in Produktion und Logistik:** Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik. Mitteilungen aus den Fachgruppen, Heft 58, 1997.
- Akartunali, K.; Miller, A. J.:** A heuristic approach for big bucket multi-level production planning problems. In: European Journal of Operational Research, Vol. 193, 2009, S. 396-411.
- Axmann, N.:** Handbuch Materialflusstechnik. Ehningen bei Böblingen: expert Verlag, 1993.
- Bamberg, G.; Bauer, F.:** Statistik. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2001.
- Bangsow, S.:** Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk: Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen. München: Carl Hanser Verlag, 2008.
- Bangsow, S.:** Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk. Anwendung und Programmierung in über 150 Beispiel-Modellen. München: Carl Hanser Verlag, 2011.

- Barbarosoglu, G.; Özdamar, L.:** Analysis of solution space-dependent performance of simulated annealing: The case of multi-level capacitated lot sizing problem. In: Computers & Operations Research, Vol. 27, 2000, S. 895-903.
- Beasley, J. E.:** Lagrangean relaxation. In: Reeves, C. R. (Hrsg.): Modern heuristic techniques for combinatorial problems. London: McGraw-Hill, 1995, S. 243-303.
- Bechte, W.:** Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1984.
- Becker, J.; Rosemann, M.:** Die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung - ein Ordnungsrahmen zur Komplexitätsbeherrschung in Prozessmodellen. In: Proceedings zur Tagung „Workflow - Management in Geschäftsprozessen im Trend 2000“, 1997, S. 18-30.
- Becker, J.; Rosemann, M.; Schütte, R.:** Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. In: Wirtschaftsinformatik, Vol. 37, Heft 5, 1995, S. 435-445.
- Beernaert, C.; John, A.; Meran, R.; Staudter, C.; Roenpage, O.; Lunau, S. (Hrsg.):** Six Sigma+Lean Toolset - Verbesserungsprojekte erfolgreicher durchführen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2007.
- Becker, J.:** Die Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung und ihre Einbettung in ein Vorgehensmodell zur Erstellung betrieblicher Informationssysteme. Paper, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 1998.
- Belvaux, G. und Wolsey, L. A.:** bc-prod: A specialized branch-and-cut system for lot-sizing problems. In: Management Science, Vol. 46, 2000, S. 724-738.
- Belvaux, G. und Wolsey, L. A.:** Modelling practical lot-sizing problems as mixed-integer programs. In: Management Science, Vol. 47, 2001, S. 993-1007.
- Bergmann, W.:** Werkstofftechnik 2: Werkstoffherstellung, Werkstoffverarbeitung, Werkstoffanwendung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2002.
- Berretta, R.; França, P. M.; Armentano, V. A.:** Metaheuristic approaches for the multilevel resource-constrained lot-sizing problem with setup and lead times. In: Asia-Pacific Journal of Operational Research, Vol. 22, 2005, S. 261-286.
- Berretta, R.; Rodrigues, L. F.:** A memetic algorithm for a multistage capacitated lot-sizing problem. In: International Journal of Production Economics, Vol. 87, 2004, S. 67-81.
- Bertalanffy, L. von:** Systemtheorie. Berlin: Colloquium Verlag, 1972.
- Biedermann, H.:** Anlagenmanagement - Managementwerkzeuge zur Wertsteigerung. Köln: TÜV Verlag, 2008.
- Billington, P. J.; McClain, J. O.; Thomas, L. J.:** Mathematical programming approaches to capacity-constrained MRP-systems: Review, formulation and problem reduction. In: Management Science, Vol. 39, 1993, S. 1126-1141.
- Boctor, F. F.; Poulin, P.:** Heuristics for n-product, m-stage, economic lot sizing and scheduling problem with dynamic demand. In: International Journal of Production Research, Vol. 43, 2005, S. 2809-2828.
- Bortz, J.; Döring, N.:** Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1995.

- Bortz, J.; Döring, N.:** Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler, 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006.
- Bouchriha, H.; Ouhimmou, M.; D'Amours, S.:** Lot sizing problem on a paper machine under a cyclic production approach. In: International Journal of Production Economics, Vol. 105, 2007, S. 318-328.
- Boysen, N.:** Reihenfolgeplanung bei Variantenfließfertigung: Ein integrativer Ansatz. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Vol. 75, 2005, S. 135-153.
- Bratley, P.; Fox, B. L.; Schrage, L. E.:** A guide to simulation. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1987.
- Brocke, J. Vom:** Referenzmodellierung - Gestaltung und Verteilung von Konstruktionsprozessen. Berlin: Logos Verlag, 2003.
- Bronner, R.:** Komplexität. In: Frese, E. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 1991.
- Bruegge, B.; Dutoit, A. H.:** Object oriented software engineering. Harlow: Pearson Verlag, 2004.
- Buschkühl, L.:** Multi-level capacitated lotsizing with setup carryover. Köln: Wissenschaftsverlag Köln, 2008.
- Buschkühl, L.; Sahling, F.; Helber, S.; Tempelmeier, H.:** Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. In: OR Spectrum, Vol. 32, Nr. 2, 2010, S. 1-31.
- Busse, T.; Fischer, A.:** Losgrößenverfahren - Die optimale Losgröße im Spannungsfeld zwischen Rüstzeiten und Beständen. Universität Hannover - Institut für Fabrikanlagen und Logistik, 2006.
- Chalmers, A.:** Wege der Wissenschaft - Einführung in die Wissenschaftstheorie. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2001.
- Chen, H.; Chu, C.:** A Lagrangian relaxation approach for supply chain planning with order/setup costs and capacity constraints. In: Journal of Systems Science and Systems Engineering, Vol. 12, 2003, S. 98-110.
- Chronéer, D.:** Product Development in Process Industry - Changes and consequences. Dissertation, Luleå University of Technology, 2005.
- Clark, A. R.; Armentano, V. A.:** A heuristic for a resource-capacitated multi-stage lot-sizing problem with lead times. In: Journal of Operational Research Society, Vol. 46, 1995, S. 1208-1222.
- Corsten, H.; Gössinger, R.:** Einführung in das Supply Chain Management. München: Oldenbourg Verlag, 2008.
- Crama, Y.; Pochet, Y.; Wera, Y.:** A discussion of production planning approaches in the process industries. University of Liège, 2001.
- Dangelmaier, W.:** Fertigungsplanung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2001.
- Dangelmaier, W.:** Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschkralinen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2009.



- Danzer, W. F.; Hube, F.:** Systems Engineering - Methodik und Praxis. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 2002.
- Dennis, D. R.; Meredith, J. R.:** An analysis of process industry production and inventory management. In: Journal of Operations Management, Vol. 18, Heft 6, 2000b, S. 683-699.
- Deuse J.; Deckert, C.:** Lean Steel Production - Schlanke Produktionsprozesse in der Stahlindustrie. In: Stahl und Eisen, Heft 6, 2006, S. 84-86.
- Derstroff, M. C.:** Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsbeschränkungen. Heidelberg: Physica Verlag, 1995.
- Dietrich, J.:** Qualitätscontrolling zur Effizienzsteigerung komplexer Produktionssysteme unter Integration von Anforderungen bei Chargenfertigung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007.
- DIN 19226:** Leittechnik - Regelungstechnik und Steuerungstechnik - Begriffe zum Verhalten dynamischer Systeme. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 40041:1990-12:** Zuverlässigkeit - Begriffe. Berlin: Beuth Verlag.
- Dombrowski, U.; Sixt, A.; Hanke, T.:** Systematische Bestandsoptimierung durch Anwendung der normierten Materialreichweite. In: PPS Management, Heft 3, 2008, S. 25-29.
- Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, St.:** Produktionsplanung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1993.
- Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, St.:** Produktionsplanung - Ablauforganisatorische Aspekte. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1997.
- Domschke, W.; Scholl, A.:** Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Ein Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005.
- Domschke, W.; Drexl, A.:** Einführung in Operations Research. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005.
- Domschke, W.:** Logistik: Rundreisen und Touren. München: Oldenbourg Verlag, 1997.
- Dorn, J. et al.:** Interaktive Feinplanung im Edelstahlwerk. Berg und Hüttenmännische Hefte, Heft 9, 2006, S. 161-175.
- Dyckhoff, H.; Spengler, T.:** Produktionswirtschaft. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005.
- Eichler, H. J.; Kronfeldt, H.-D.; Sahm, J.:** Das Neue Physikalische Grundpraktikum. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006
- Engesser, H.; Claus, V.; Schwill, A.:** Duden Informatik. Stuttgart: Teubner Verlag, 1995.
- Eppen, G.D.; Martin, R.K.:** Solving multi-item capacitated lot-sizing problems using variable redefinition. In: Operations Research, Vol. 35, 1987, S. 832-834.
- Eversheim, W.:** Flexible Produktionssysteme. In: Frese, H. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 1992.
- Fandel, G.; Stammen-Hegener, C.:** Ein Ansatz zum General Lot Sizing and Scheduling Problem (GLSP) für die mehrstufige Fertigung. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Vol. 75, 2005, S. 879-893.

- Favre-Bulle, B.:** Automatisierung komplexer Industrieprozesse - Systeme, Verfahren und Informationsmanagement. Wien, New York: Springer Verlag, 2004.
- Feiner, S. K. et al.:** Hybride Produktionssysteme. In: Brecher, C. et al.: Integrative Produktionstechnik in Hochlohnländern. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2011.
- Feldmann, M.:** Naturalanaloge Verfahren - Metaheuristiken zur Reihenfolgeplanung. Dissertation, Universität Bielefeld, 1999.
- Ferreira, D.; Morabito, R.; Rangel, S.:** Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot-scheduling models for small-scale soft drink plants. In: International Journal of Computers and Operations Research, Vol. 37, 2009, S. 684-691.
- Ferreira, D.; Clark, A. R.; Almada-Lobo, B.; Morabito, R.:** Single-stage formulations for synchronised two-stage lot sizing and scheduling in soft drink production. In: International Journal of Production Economics, Vol. 136, Issue 2, 2012, S. 255-265.
- Flechtner, J.:** Grundbegriffe der Kybernetik - Eine Einführung. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft GmbH, 1970.
- Fleischhacker, A. J.; Zhao, Y.:** Planning for demand failure: A dynamic lot size model for clinical trial supply chains. In: European Journal for Operational Research, 2009.
- Förster, A.; Haase, K.; Tönnies, M.:** Ein modellgestützter Ansatz zur mittelfristigen Produktions- und Ablaufplanung für eine Brauerei. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Vol. 76, 2006, S. 1255-1274.
- François, P.:** Flexible Losgrößenplanung in Produktion und Beschaffung, Heidelberg: Physica-Verlag, 2000.
- França, P. M.; Armentano, V.A.; Berretta, R. E.; Clark, A. R.:** A heuristic method for lot-sizing in multi-stage systems. In: Computers & Operations Research, Vol. 24, 1997, S. 861-874.
- Franken, M.:** Produktionsplanung und -steuerung in strategischen Netzwerken. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 2003.
- Freidank, C.-C.:** Kostenrechnung. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2007.
- Friedrichs, J.:** Methoden empirischer Sozialforschung. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1985.
- Fröhling, M.:** Zur taktisch-operativen Planung stoffstrombasierter Produktionssysteme. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 2006.
- Fricke, A. R.:** Eine Methodik zur Modellierung, Analyse und Gestaltung komplexer Produktionsstrukturen. Verlag der Augustinus-Buchhandlung, 1996.
- Gicquel, C.; Hege, L.; Minoux, M.; Can Canneyt, W.:** A discrete time exact solution approach for a complex hybrid flow-shop scheduling problem with limited-wait constraints. In: Computers & Operations Research, Vol. 39, Issue 3, 2012, S. 629-636.
- Göthe-Lundgren, M.; Lundgren, J. T.; Persson, J. A.:** An optimization model for refinery production scheduling. In: International Journal of Production Economics, Vol. 79, 2002, S. 255-270.
- Goldstein, B.:** Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 1999.

- Gollwitzer, M.; Karl, R.:** Logistik-Controlling - Leistung, Kosten, Durchlaufzeiten und Bestände. München: Wirtschaftsverlag Langen Müller/Herbig, 1998.
- Große-Heitmeyer, V.; Wiendahl, H.-P.:** Grundansatz des Produktionsstufenkonzeptes. In: Wiendahl, H.-P.; Gerst, D.; Keunecke, L. (Hrsg.): Variantenmanagement in der Montage - Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2004.
- Grünert, T.:** Multi-level sequence-dependent dynamic lot sizing and scheduling. Aachen: Shaker Verlag, 1998.
- Günther, H. O.:** Ressourceneinsatzplanung bei Chargenproduktion in der chemischen Industrie. In: WiST, Heft 6, 2004, S. 381-384.
- Günther, H. O.; Tempelmeier, H.:** Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005.
- Gupta, J.; Smith, K.:** Neural Networks in Business: Techniques and Applications. Hershey, London: IRM Press, 2002.
- Gutenberg, E.:** Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Die Produktion. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1983.
- Gutierrez, E.; Hernandez, W.; Süer, G.A.:** Genetic algorithms in capacitated lot sizing decisions. In: Proceedings of the Computing Research Conference 2001. Mayaguez, Puerto Rico, 2001, S. 1-4.
- Haase, K.:** Capacitated lot-sizing with sequence dependent setup costs. In: OR Spectrum, Vol. 18, 1996, S. 51-59.
- Haberfellner, R.:** Die Unternehmung als dynamisches System - der Prozesscharakter der Unternehmensaktivitäten. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1975.
- Hassenstein, B.:** Element und System - geschlossene und offene Systeme. In Kurzrock, R. (Hrsg.): Systemtheorie. Berlin: Colloquium Verlag, 1972.
- Harrington, H. J.; Kerim, T.:** Simulation Modeling Methods - To reduce risks and increase performance. New York: McGraw-Hill, 2000.
- Harris, F. W.:** How many parts to make at once. In: Factory, the Magazine of Management. Vol. 10, 1913, S. 135-136. 152. Neudruck in Operations Research, Vol. 38, 1990, S. 947-950.
- Harrison, T. P.; Lewis, H. S.:** Lot sizing in serial assembly systems with multiple constrained resources. In: Management Science, Vol. 42, 1996, S. 19-36.
- Hecking, M.:** Simulationsplanung - Logistikplanung mit Simulationsplanungssoftware. Studienarbeit. Norderstedt: Grin Verlag, 2009.
- Heina, J.:** Variantenmanagement: Integrierte Kosten-Nutzen-Bewertung zur Optimierung der Variantenvielfalt. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1999.
- Helber, S.:** Lot sizing in capacitated production planning and control systems. In: OR Spectrum, Vol. 17, 1995, S. 5-18.
- Helber, S.:** Kapazitätsorientierte Losgrößenplanung in PPS-Systemen. Stuttgart: Metzler & Poeschel - Verlag für Wissenschaft und Forschung, 1994.

- Hesse, C.:** Wahrscheinlichkeitstheorie: Eine Einführung mit Beispielen und Anwendungen. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag, 2009.
- Heß, G.:** Logistik - Controlling. In Koether, R. (Hrsg.): Taschenbuch der Logistik. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- Hill, J. A.; Berry, W. L.; Schilling, D. A.:** Revising the master production schedule in sequence dependent processes. In: International Journal of Production Research, Vol. 41, Nr. 9, 2003, S. 2021-2035.
- Hill, J. A.; Berry, W. L.; Keong Leong, G.; Schilling, D. A.:** Master production scheduling in capacitated sequence-dependent process industries. In: International Journal of Production Research, Vol. 38, Issue 18, 2000, S. 4743-4761.
- Hoitsch, H.-J.; Lingnau, V.:** Kosten- und Erlösrechnung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2007.
- Hollender, M.:** Collaboration Process Automation Systems. ISA - International Society of Automation, 2010.
- Hoque, M.A.; Kingsman, B.G.:** Synchronization in common cycle lot size scheduling for a multi-product serial supply chain. In: International Journal of Production Economics, Vol. 103, Issue 1, 2006, S. 316-331.
- Hughes, H.K.:** Utopias and Cybernetic Cultures. In Edmond, D. M. (Hrsg.): Cybernetics and the Management of large Systems. New York: Macmillan & Co. LTD, 1969.
- Hung, Y. F.; Chien, K. L.:** A multi-class multi-level capacitated lot sizing model. In: Journal of Operations Research Society, Vol. 51, 2000, S. 1309-1318.
- Jahnke, H.; Biskup, D.:** Produktion. In: Becker, F. G. (Hrsg.): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006.
- Kaluza, B.; Blecker, T. (Hrsg.):** Erfolgsfaktor Flexibilität. Strategien und Konzepte für wandlungsfähige Unternehmen. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2004.
- Karimi, B.; Ghomi, S. M. T. F.; Wilson, J. M.:** The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms. In: Omega, Vol. 31, 2003, S. 365-378.
- Karmarkar, U. S.; Schrage, L.:** The deterministic dynamic product cycling problem. In: Operations Research, Vol. 33, 1985, S. 326-345.
- Katok, E.; Lewis, H. S.; Harrison, T. P.:** Lot sizing in general assembly systems with setup costs, setup times, and multiple constrained resources. In: Management Science, Vol. 44, 1998, S. 859-877.
- Keck, E. W.:** Modellanalyse der Prozessindustrie zur Gestaltung kundennaher Produktionssysteme. Dissertation, Technische Universität München, 1994.
- Kenné, J.-P.; Dejax, P.; Gharbi, A.:** Production planning of a hybrid manufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain. In: International Journal of Production Economics, Vol. 135, Issue 1, 2012, S. 81-93.
- Kern, W.:** Der Betrieb als Faktorkombination. In Jacob, H. (Hrsg.): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 1988.

- Kerner, A.:** Modellbasierte Beurteilung der Logistikleistung von Prozessketten. Dissertation, Universität Hannover, 2002.
- Kiener, S. et al.:** Produktionsmanagement. München: Oldenbourg Verlag, 2006.
- Kimms, A.:** Competitive methods for multi-level lot sizing and scheduling: Tabu search and randomized regrets. In: International Journal of Production Research, Vol. 34, 1996a, S. 2279-2298.
- Kimms, A.:** Multi-level, single-machine lotsizing and scheduling (with initial inventory). In: European Journal of Operations Research, Vol. 89, 1996b, S. 86-99.
- Kimms, A.:** Multi-level lot sizing and scheduling: Methods for capacitated, dynamic, and deterministic models. Heidelberg: Physica Verlag, 1997.
- Kingsman B.G.; Tarim, S.A.:** The stochastic dynamic production/inventory lot-sizing problem with service-level constraints. In: International Journal for Production Economics, Vol. 88, 2004, S. 105-119.
- Kirchhof, R.:** Ganzheitliches Komplexitätsmanagement. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 2003.
- Klaus, G. et al.:** Wörterbuch der Kybernetik. 4. Auflage, Berlin: Dietz Verlag, 1976.
- Klocke, P. et al.:** Hybride Produktionssysteme. In: Brecher, C. et al.: Integrative Produktionstechnik in Hochlohnländern. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2011.
- Klodt, H. et al.:** Die neue Ökonomie: Erscheinungsformen, Ursachen und Auswirkungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2003.
- Koether, R.:** Material- und Fertigungswirtschaft sowie Logistik. In Wollenberg, K.(Hrsg.): Taschenbuch der Betriebswirtschaft. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2000.
- Koether, R.:** Logistik als Managementaufgabe. In Koether, Reinhard (Hrsg.): Taschenbuch der Logistik. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- Koffler, J. R.:** Neure Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung. München: Florentz Verlag, 1987.
- Kolonko, M.:** Stochastische Simulation - Grundlagen, Algorithmen und Anwendungen. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag, 2008.
- Kopanos, G. M.; Méndez, C. A.; Puigjaner, L.:** MIP-based decomposition strategies for large-scale scheduling problems in multiproduct multistage batch plants: A benchmark scheduling problem of the pharmaceutical industry. In: European Journal of Operational Research, Vol. 207, Issue 2, 2010, S. 644-655.
- Kosturiak, J.; Gregor, M.:** Simulation von Produktionssystemen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1995.
- Krenn, B.:** Bewertung von Komplexität in Materialflusssystemen der Prozessindustrie am Beispiel der Stahl- und Feuerfestindustrie. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2008.
- Kromrey, H.:** Empirische Sozialforschung: Modelle und Methoden der Datenauswertung und Datenerhebung, 8. Auflage. Stuttgart: UTB Verlag, 1998.

- Krumpf, A.:** Anforderungsgerechte Modellierung von Materialflusssystemen zur planungsbegleitenden Simulation. Dissertation, Technische Universität München, 2001.
- Kühn, W.:** Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner. München: Carl Hanser Verlag, 2006.
- Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl H.-P. (Hrsg.):** Handbuch Simulationsanwendung in Produktion und Logistik. Reihe Fortschritte in der Simulationstechnik. Band 7. Braunschweig: Vieweg Verlag, 1993.
- Kuik, R.; Salomon, M.; Wassenhove, L. N. van; Maes, J.:** Linear programming simulated annealing and tabu search heuristics for lotsizing in bottleneck assembly systems. In: IIE Transactions, Vol. 25, 1993, S. 62-72.
- Kupferhütte:** Tradition und Zukunft. Unternehmensunterlagen, 2011a.
- Kupferhütte:** Beschreibung der technischen Anlagen der Kupferhütte. Unternehmensunterlagen, 2011b.
- Kupferhütte:** Übersicht Gießerei. Besprechungsprotokoll, 2011c.
- Kupferhütte:** Auftragsliste Stranggussware 2011. Unternehmensunterlagen, 2012.
- Kurbel, K.:** Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. München: Oldenbourg Verlag, 2005.
- Kummer, S.; Grün, O.; Jammernegg, W.:** Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. Pearson Studium, 2006.
- Lange, C.:** Neuronale Netze in der wirtschaftswissenschaftlichen Prognose und Modellgenerierung. Eine Theoretische und empirische Betrachtung mit Programmier-Beispielen. Heidelberg: Physica Verlag, 2004.
- Law, A. M.; Kelton, W. D.:** Simulation modeling and analysis. New York: McGraw-Hill, 1991.
- Lerner, A.:** Grundzüge der Kybernetik. Berlin: Verlag Technik, 1970.
- Lödding, H.:** Verfahren der Fertigungssteuerung - Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2008.
- Lödding, H.:** Ein Modell der Fertigungssteuerung - Logistische Ziele systematisch erreichen. In Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2008.
- Löschner, J.; Pichler, T.; Schiefer, E.:** Overall Equipment Effectiveness (OEE) als Steuerungsinstrument in Produktionssystemen - Komplexitätsbeherrschung bei verketteten Aggregaten. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Komplexitätsorientiertes Anlagenmanagement. Köln: TÜV Verlag, 2006.
- Loos, P.:** Produktionslogistik in der chemischen Industrie - Betriebstypische Merkmale und Informationsstrukturen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 1997.
- Lucas, K.:** Thermodynamik - Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2007.
- Lutz, S.; Lödding, H.; Wiendahl, H.-P.:** Logistics-oriented inventory analysis. In: International Journal for Production Economics, Vol. 85, 2003, S. 217-231.

- Maes, J.; McClain, J. O.; van Waasenhove, L. N.:** Multilevel capacitated lotsizing complexity and LP-based heuristics. In: *European Journal of Operations Research*, Vol. 53, 1991, S.131-148.
- März, L.:** Anwendungsumgebung zur Simulation und Optimierung von Transportnetzen. In: Engelhardt-Nowitzki, C. et al. (Hrsg.): *Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement: Erfolgsfaktoren und Implementierungsszenarien*. Wiesbaden: Gabler Edition Wissenschaft, 2008.
- Malik, F.:** *Strategie des Managements komplexer Systeme*. Bern: Paul Haupt Verlag, 1996.
- Mehra, S.; Inman, R. A.; Tuite, G.:** A simulation-based comparison of batch sizes in a continuous processing industries. In: *Production Planning & Control*, Vol. 17, Issue 1, 2006, S. 54-66.
- Meyer, R.; Wenzel, S.:** Kopplung der Simulation mit Methoden des Datenmanagements. In: Kuhn, A. et al. (Hrsg.): *Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik. ASIM-Reihe Fortschritte der Simulationstechnik. Band 7*. Braunschweig: Vieweg Verlag, 1993.
- Meyr, H.:** *Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für kontinuierliche Produktionslinien: Modelle und Methoden im Rahmen des Supply Chain Management*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 1999.
- Meyr, H.:** *Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei mehrstufiger kontinuierlicher Fertigung*. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Vol. 74, 2004, S. 585-609.
- Missbauer, H.:** *Bestandsregelung als Basis für die Neugestaltung von PPS-Systemen*. Heidelberg: Physica Verlag, 1998.
- Mohammadi, M.; Fatemi Ghomi, S. M. T.:** Genetic algorithm-based heuristic for capacitated lotsizing problem in flow shops with sequence-dependent setups. In: *International Journal of Production Economics*, Vol. 38, Issue 6, 2011, S. 7201-7207.
- Moorkanat, J.:** *Studies in certain resource loading, scheduling und production control problems in multi-stage production control problems in multistage production inventory systems*. Dissertation, Indian Institute of Technology Bombay, 2000.
- Nakajima, S.:** *Management der Produktionseinrichtungen - Total Productive Maintenance*. Frankfurt: Campus Verlag, 1995.
- Nascimento, M. C. V.; Resende, M. G. C.; Toledo, F. M. B.:** GRASP heuristic with path-relinking for the multi-plant capacitated lot sizing problem. In: *European Journal of Operations Research*, Vol. 200, Issue 3, 2010, S. 747-754.
- Neuhaus, U.:** *Reaktive Planung in der chemischen Industrie: Verfahren zur operativen Plananpassung für Mehrzweckanlagen*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 2008.
- Neumann, K.; Schwindt, C.; Trautmann, N.:** Scheduling of continuous and discontinuous material flows with intermediate storage restrictions. In: *European Journal of Operational Research*, Vol. 165, Issue 2, 2005, S. 495-509.
- Newman, A. M.; Kuchta, M.:** Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine. In: *European Journal of Operational Research*, Vol. 176, 2007, S. 1205-1218.
- Niemeyer, G.:** *Simulation*. In Kurbel, K. et al. (Hrsg.): *Handbuch Wirtschaftsinformatik*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 1990.

- Nyhuis, P., Grabe, D., Nickel, R.:** Bewertung von Lager- und Fertigungsprozessen mit Logistischen Kennlinien. In: Hagen, N.; Nyhuis, P.; Frühwald, C.; Felder, M. (Hrsg.): Prozessmanagement in der Wertschöpfungskette. Bern: Paul Haupt Verlag, 2006.
- Nyhuis, P.; Vogel, M.:** Adaptation of logistic operating curves to one-piece flow processes. In: International Journal of Production and Performance Management, Vol. 55, No. 3/4, 2006, S. 284-299.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.:** Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1999.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.:** Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2003.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.:** Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.:** Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2012.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.:** Fundamentals of Production Logistics: Theory, Tools and Application. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2009.
- Nyhuis, P.:** Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung. Dissertation, Universität Hannover. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 225., Düsseldorf, 1991.
- Nyhuis, P.:** Entwicklungsschritte zu Theorien der Logistik. In Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2008.
- Nyhuis, P.:** Produktionskennlinien - Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. In Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2008.
- Özdamar, L.; Bozyel, M.A.:** The capacitated lot sizing problem with overtime decisions and setup times. In: IIE Transactions, Vol. 32, 2000, S. 1043-1057.
- Özdamar, L.; Barbarosoglu, G.:** An integrated Lagrangean relaxation-simulated annealing approach to the multi-level multi-item capacitated lot sizing problem. In: International Journal of Production Economics, Vol. 68, 2000, S. 319-331.
- Özdamar, L.; Barbarosoglu, G.:** Hybrid heuristics for the multi-stage capacitated lot sizing and loading problems. In: Journal of Operational Research Society, Vol. 50, 1999, S. 810-825.
- Oztürk, C.; Ornek, A. M.:** Capacitated lot sizing with linked lots for general product structures in job shops. In: Computers and Industrial Engineering, Vol. 58, Issue 1, 2010, S. 151-164.
- Pahl, J.; Voß, S.; Woodruff, D. L.:** Production planning with load dependent lead times: an update of research. In: Annals of Operations Research, Nr. 153 (1), 2007, S. 297-345.
- Pallewek, G.:** Produktionslogistik: Planung - Steuerung - Controlling. München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- Pawlek, F.:** Metallhüttenkunde. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1983.
- Pfohl, H.-Chr.; Stölze, W.:** Planung und Kontrolle. München: Vahlen Verlag, 1997.
- Pieper, D.:** Bestandsmanagement in Distributionsnetzen. München: Grin Verlag, 2008.



- Pitakaso, R.; Almeder, C.; Doerner, K.F.; Hartl, R.F.:** Combining population-based and exact methods for multi-level capacitated lot-sizing problems. In: International Journal of Production Research, Vol. 44, 2006, S. 4755-4771.
- Plinke, W.:** Industrielle Kostenrechnung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1997.
- Pochet, Y.; Wolsey, L. A.:** Solving multi-item lot-sizing problems using strong cutting planes. In: Management Science, Vol. 37, 1991, S. 53-67.
- Pochet, Y.; Wolsey, L. A.:** Production planning by mixed integer programming. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006.
- Preißler, P. R.:** Betriebswirtschaftliche Kennzahlen: Formeln - Aussagekraft - Sollwerte - Ermittlungsintervalle. München: Oldenbourg Verlag, 2008.
- Puchta, M.:** Optimierung von Problemstellungen aus der diskreten und der Prozessindustrie unter Verwendung physikalischer Verfahren. Dissertation, Universität Regensburg, 2004.
- Purgathofer, W.:** Graphische Datenverarbeitung. Wien, New York: Springer Verlag, 1985.
- Quadt, D.; Kuhn, H.:** Capacitated lot-sizing with extensions: A review. In: 4 OR: A Quarterly Journal of Operations Research, Vol. 6, 2008, S. 61-83.
- Quenin, H.:** Statistische Prozessregelung - SPC. München: Carl Hanser Verlag, 2008.
- Raab-Steiner, E.; Benesch, M.:** Der Fragebogen: Von der Forschungsidee zur SPSS-Auswertung. Wien: Facultas.wuv Verlag, 2008.
- Rabe, M.; Wenzel, S.; Spieckermann, S.:** Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2008.
- Rasch, B.; Friese, M.; Hofmann, W.; Naumann, E.:** Quantitative Methoden 1: Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2010.
- Rappold, J. A.; Yoho, K. D.:** A model for level-loading production in process industries when demand is stochastic. In: Production Planning & Control, Vol. 19, Issue 7, 2008, S. 686-701.
- REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation:** Methodenlehre der Betriebsorganisation: Planung und Steuerung, Teil 1-6. München: Carl Hanser Verlag, 1993.
- REFA Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung:** Datenermittlung. München: Carl Hanser Verlag, 1997.
- Reggelin, T.:** Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme. In Wimmer, T. et al. (Hrsg.): 28. Deutscher Logistik-Kongress - Kongressband 2011. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2011.
- Reichmann, T.:** Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten. München: Vahlen Verlag, 1995.
- Reidel, S.:** Ein genetischer Algorithmus zur kostenorientierten Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung bei getakteten Mehrproduktfließlinien. Dissertation, Universität Passau, 2006.
- Reinsch, S.:** Kennzahlenbasierte Positionierung der Logistik von Lieferketten. Dissertation, Universität Hannover, 2003.

**Rezagholi, M.:** Prozess- und Technologiemanagement in der Softwareentwicklung: Ein Metrik basierter Ansatz zur Bewertung von Prozessen und Technologien. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2004.

**Ribas, I.; Leisten, R.; Framiñan, J. M.:** Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. In: Computers & Operations Research, Vol. 37, Issue, 8, 2010, S. 1439-1454.

**Riebel, P.:** Industrielle Erzeugungsverfahren in betriebswirtschaftlicher Sicht. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1963.

**Roman, S.:** Writing Excel Macros with VBA. Kalifornien: O'Reilly Media Inc, 2002.

**Ropohl, G.:** Systemtechnik - Grundlagen und Anwendung. München: Carl Hanser Verlag, 1975.

**Rossi, H.:** Ein heuristisches Dekompositionsverfahren für mehrstufige Losgrößenprobleme. Dissertation, Freie Universität Berlin, 2005.

**Sahling, F.:** Mehrstufige Losgrößenplanung bei Kapazitätsrestriktionen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 2010.

**Salomon, M.:** Deterministic lotsizing models for production planning. Lecture notes in economics and mathematical systems, Nr. 355. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1991.

**Sarac, A.; Batta, R.; Rump, C. M.:** A branch-and-price approach for operational aircraft maintenance routing. In: European Journal of Operational Research, Vol. 175, 2006, S. 1850-1869.

**Scharbrodt, M.:** Produktionsplanung in der Prozessindustrie: Modelle, effiziente Algorithmen und Umsetzung. Dissertation, Universität München, 2000.

**Schemme, K.:** Unverzichtbarer Rohstoff für die Stahlindustrie. Eisen und Stahl, Heft 12, 2006, S. 78-81.

**Schenk, M.; Tolujew, J.; Reggelin, T.:** Mesoskopische Simulation von Flusssystemen - algorithmisch steuern und analytisch berechnen. In Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2008.

**Schiemenz, B.; Schönert, O.:** Entscheidung und Produktion. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005.

**Schneeweiß, C.:** Planung 2. Konzepte der Prozess- und Modellgestaltung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1992.

**Schneider, H. M.; Buzacott, J. A.; Rücker, T.:** Operative Produktionsplanung und -steuerung: Konzepte und Modelle des Informations- und Materialflusses in komplexen Fertigungssystemen. München: Oldenbourg Verlag, 2005.

**Schönleben, P.:** Integrales Logistikmanagement - Planung und Steuerung von umfassenden Geschäftsprozessen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2007.

**Schönleben, P.:** Integrales Logistikmanagement: Operations and Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2011.

- Schoner, P.:** Operative Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Industrie. Dissertation, Universität Kassel, 2007.
- Schoner, P.:** Operative Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Industrie. Kassel: University Press, 2008.
- Schütte, R.:** Grundlagen ordnungsgemäßer Referenzmodellierung - Theoretische Grundlagen und praktische Anwendung. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 1998.
- Schütte, R.:** Die neuen Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. Paper zum Forschungsforum `97, Leipzig, 1997.
- Schuh, G.:** Produktionsplanung und -steuerung - Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006.
- Schulte, G.:** Unternehmensübergreifende Produktionsplanung. Koordination in Unternehmensnetzwerken mit Hilfe variabler Optimierungszentren. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2009.
- Schumann, C. A.; Brent, A. C.:** Asset life cycle management: towards improving physical asset performance in the process industry. In: International Journal of Operations and Production Management, Vol. 25, Nr. 6, 2005, S. 566-579.
- Schwarz, R.:** Controlling-Systeme: Eine Einführung in Grundlagen, Komponenten und Methoden des Controlling. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 2002.
- Seipl, C.:** Simulation kontinuierlicher Prozesse in hierarchischen Produktionsplanungssystemen - Entwicklung von Werkzeugen und Experimentelle Analyse. Dissertation, Universität Hamburg, 2009.
- Siemens Industry Software GmbH & Co. KG:** Simulation, Visualisierung, Analyse und Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen. URL: <http://www.emplant.de/index.html> (Stand: 2011; Zugriff: 21.11.2011; MEZ: 08:48 Uhr).
- Sommerville, I.:** Software Engineering 7. Harlow: Pearson Verlag, 2004.
- Spengler, T.; Voß, St.; Kopfer, H.:** Logistik Management: Prozesse, Systeme, Ausbildung. Heidelberg: Physica Verlag, 2008.
- Stachowiak, H.:** Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer Verlag, 1973.
- Stadler, H.:** Multi-level single machine lot-sizing and scheduling with zero lead times. In: European Journal for Operations Research, Vol. 209, Issue 3, 2011, S. 241-252.
- Stadler, H.:** How important is to get the right lot size? In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Vol. 77, Heft 4, 2007, S. 407-416.
- Stadler, H.:** Multilevel lot sizing with setup times and multiple constrained resources: Internally rolling schedules with lot-sizing windows. In: Operations Research, Vol. 51, 2003, S. 487-502.
- Stadler, H.:** Reformulations of the shortest route model for dynamic multi-item multi-level capacitated lotsizing. In: OR Spectrum, Vol. 19, 1997, S. 87-96.
- Stadler, H.:** Mixed integer programming model formulations for dynamic multi-item multi-level capacitated lotsizing. In: European Journal of Operational Research, Vol. 94, 1996, S. 561-581.

- Stadler, H.; Sürle, C.:** The capacitated lot-sizing problem with linked lot sizes. In: Management Science, Vol. 49, 2003, S. 1039-1054.
- Steland, A.:** Basiswissen Statistik - Kompaktkurs für Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2010.
- Stammen-Hegener, C.:** Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei ein- und mehrstufiger Fertigung. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 2002.
- Stermann, J. D.:** A skeptic's Guide to Computer Models. In: Barney, G. O. et al. (Hrsg.): Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalog. Boulder, CO, Westview Press, 1991, S. 209-229.
- Steven, M.:** Handbuch Produktion: Theorie - Management - Logistik - Controlling. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH, 2007.
- Steven, M.:** Hierarchische Produktionsplanung. Heidelberg: Physica Verlag, 1994.
- Sürle, C.:** Time continuity in discrete time models - New approaches for production planning in process industries. Dissertation, Universität Darmstadt, 2005.
- Sürle, C.; Tempelmeier, H.:** The capacitated lot-sizing problem with linked lot sizes. In: Management Science, Vol. 49, 2003, S. 1039-1054.
- Suhl, L.; Mellouli, T.:** Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006.
- Suhl, L.; Mellouli, T.:** Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2009.
- TCW Transfer-Centrum GmbH und Co KG:** Problemstellung des Rüstmanagement. URL: [http://www.tcw.de/static\\_pages/view/217](http://www.tcw.de/static_pages/view/217) (Stand: 2010; Zugriff: 04.02.2011; MEZ: 13:11 Uhr).
- Teich, T.:** Extended Value Chain Management - ein Konzept zur Koordination von Wertschöpfungsnetzwerken. Habilitation, Technische Universität Chemnitz, 2002.
- Tempelmeier, H.:** Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005.
- Tempelmeier, H.:** Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2008a.
- Tempelmeier, H.:** Supply Chain Management und Produktion. Norderstedt: Books on Demand, 2008b.
- Tempelmeier, H.; Buschkühl, L.:** A heuristic for the dynamic multi-level capacitated lotsizing problem with linked lot sizes for general product structures. In: OR Spectrum, Vol. 31, 2009, S. 385-404.
- Tempelmeier, H.; Derstroff, M.:** Mehrstufige Mehrprodukt-Losgrößenplanung bei beschränkten Ressourcen und genereller Erzeugnisstruktur. In: OR Spektrum, Vol. 15, 1993, S. 63-73.
- Tempelmeier, H.; Derstroff, M.:** A Lagrangean-based heuristic for dynamic multi-level multi-item constrained lotsizing with setup times. In: Management Science, Vol. 42, 1996, S. 738-757.

- Tempelmeier, H.; Helber, S.:** A heuristic for dynamic multi-item multi-level capacitated lotsizing for general product structures. In: European Journal of Operational Research, Vol. 75, 1994, S. 296-311.
- Tempelmeier, H.; Kuhn, H.:** Flexible Fertigungssysteme - Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1993.
- Thaler, T.:** Diskrete Ereignissimulation im Kontext BPM. Forschungsarbeit. Norderstedt: Grin Verlag, 2011.
- Thommen, J. P.:** Managementorientierte Betriebswirtschaftslehre. Zürich: Versus Verlag, 2004.
- Töpfer, A.:** Betriebswirtschaftslehre: Anwendungs- und prozessorientierte Grundlagen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2007.
- Trautmann, N.:** Anlagenbelegungsplanung in der Prozessindustrie. Dissertation, Technische Universität Karlsruhe, 2000.
- Trautmann, N.:** Operative Planung der Chargenproduktion. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 2004.
- Ulrich, H.:** Die Unternehmung als produktives soziales System. Bern: Paul Haupt Verlag, 1970.
- Ulrich, H.:** Skizze eines allgemeinen Bezugsrahmens für die Managementlehre. In Ulrich, H. (Hrsg.): Grundlegung einer allgemeinen Theorie der Gestaltung, Lenkung und Entwicklung zweckorientierter, sozialer Systeme. Diskussionsbeitrag 4/1984, Universität St. Gallen, 1984.
- Ulrich, H.:** Systemorientiertes Management. Bern: Paul Haupt Verlag, 2001.
- Vahrenkamp, R.:** Produktionsmanagement. München: Oldenburg Verlag, 2008.
- Varma, S.; Wadhwa, S.; Deshmukh, S. G.:** Evaluating petroleum supply chain performance. Application of analytical hierarchy process to balanced scorecard. In: Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics, Vol. 20, Nr. 3, 2008, S. 343-356.
- VDI 3633:** Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. In: VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik. Band 8. Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- Volland, S.:** Produktivitätssteigerung durch SMED. In: Productivity Management, Vol. 3, 2011, S.18-20.
- Vossebein, U.:** Materialwirtschaft und Produktionstheorie. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 1997.
- Voß, S.; Witt, A.:** Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application. In: International Journal of Production Economics, Vol. 105, Issue 2, 2007, S. 445-458.
- Wachsmann, J.:** Kennliniengestützte Durchführung von Logistiksimulationen. Dissertation, Universität Hannover, 2006.
- Weber, B.-R.:** Erzeugung von Produktionsplänen für die Pharmawirkstoffherstellung durch Kombination metaheuristischer Elemente und mathematischer Optimierung. Dissertation, Universität Hamburg, 2009.
- Weber, H.:** Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieure. Stuttgart: Teubner Verlag, 1992.

- Weber, J.:** Logistik- und Supply-Chain-Controlling. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 2002.
- Wendemeier, H.-G.** von: Entscheidungsunterstützung in der Fertigungssteuerung mit Hilfe der Simulation. Dissertation, Universität Hannover, 1989.
- Wenzel, S.; Collisi-Böhmer, S.; Weiß, M.; Rose, O.; Pitsch, H.:** Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2008.
- Westphal, J.:** Komplexitätsmanagement in der Produktionslogistik. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2001.
- Wiendahl, H.-P.:** Fertigungssteuerung mit BOA und CONWIP. In Koether, Reinhard (Hrsg.): Taschenbuch der Logistik. 2., aktualisierte Auflage, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- Wiener, N.:** Cybernetics. New York: John Wiley & Sons, 1948.
- Wildemann, H.:** Komplexitätsmanagement - Vertrieb, Produkte, Beschaffung, F&E, Produktion und Administration. München: 2000.
- Wildemann, H.:** Variantenmanagement - Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung und Komplexitätsbeherrschung. München: 2003.
- Winston, W. L.:** Operations Research - Applications and Algorithms. Kanada: Brooks/Cole, 2004.
- Wirtschaftslexikon Gabler:** Definition Losgrößenplanung. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/losgroesse.html> (Stand: 2011; Zugriff: 21.11.2011, MEZ 12:47 Uhr).
- Wirtschaftslexikon Gabler:** Definition Losgröße. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/losgroesse.html> (Stand: 2011; Zugriff: 21.11.2011, MEZ 12:54 Uhr).
- Wirtschaftslexikon Gabler:** Definition Lossequenzplanung. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/54566/lossequenzenplanung-v5.html> (Stand: 2012; Zugriff: 27.08.2012, MEZ 15:09 Uhr).
- Wirtschaftslexikon Gabler:** Definition Produktion. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/produktion.html> (Stand: 2012; Zugriff: 01.04.2012, MEZ 15:40 Uhr).
- Wu, T.; Shi, L.; Geunes, J.; Akartunali, K.:** An optimization framework for solving capacitated multi-level lot-sizing problems with backlogging. In: European Journal of Operational Research, Vol. 214, Issue 2, 2011, S. 428-441.
- Xie, J.; Dong, J.:** Heuristic genetic algorithms for general capacitated lot-sizing problems. In: Computers & Mathematics with Applications, Vol. 44, 2002, S. 263-276.
- Yang, G.:** Produktionsplanung in komplexen Wertschöpfungsnetzwerken. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag Gabler, 2005.
- Yu, K.-W.:** Schedule Reliability Operating Curves. In: Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Fundamentals of Production Logistics: Theory, Tools and Applications. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2009.

**Zielowski, C.:** Managementkonzepte aus der Sicht der Organisationskultur - Auswahl, Ausgestaltung und Einführung. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2005.

**Zsifkovits, H.; Krenn, B.:** Beherrschung von komplexen Systemen durch Modellbildung und Simulation. In: Engelhardt-Nowitzki, C. et al. (Hrsg.): Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation - State-of-the-Art und innovative Konzepte. Wiesbaden: Gabler Edition Wissenschaft, 2007.

**Zimmermann, W.; Stache, U.:** Operations Research: Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung. München: Oldenbourg Verlag, 2001.

**Zimmermann, H.-J.:** Operations Research: Methoden und Modelle. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag, 2007.

**Zorut, S.; Jovan, V.; Gradišar, D.; Mušič, G.:** Closed-loop control of polymerisation plant using production performance indicators (PIs). In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 22, Issue 12, 2009, S. 1128-1143.

## Anhang A

### EXPERTENBEFRAGUNG I

#### Problematiken am Übergang von einer kontinuierlichen auf eine diskontinuierliche Fertigung

**Unternehmen und Ansprechperson:**

**Branche:**

**Datum:**

1. Bitte beschreiben Sie, wo in Ihrem Unternehmen der Übergang von einer kontinuierlichen Fertigung auf eine diskontinuierliche Fertigung auftritt (Maschinen, Produkte etc.).
  
2. Welche Probleme hinsichtlich des/der
  - a. Materialflusses
  - b. Informationsflusses
  - c. Losgrößenplanung
  - d. Produktions(ablauf/programm)planungtreten an der Schnittstelle von der kontinuierlichen Fertigung (Stoffumwandlungsprozess) zur diskontinuierlichen Fertigung (Stoffumformung) auf?
  
3. Wie handhaben Sie die unter 2.) beschriebenen, auftretenden Probleme hinsichtlich des/der
  - a. Materialflusses
  - b. Informationsflusses
  - c. Losgrößenplanung
  - d. Produktions(ablauf/programm)planung?



## Anhang B

```

%Bezier-Kurven als Basisgleichung für Kennlinienverlauf

%*****
% 1. Versuch:

n=4; %Anzahl der Stützpunkte (n+1)=5

P=[0 0;0.2 0.6;0.3 0.75;0.4 0.9;1 1]; %P_1(0/0) und P_5(1/1)
                                     % weitere 3 Punkte zur Anpassung

for j=1:101      %t:=(j-1)/100 Laufvariable

    for i=1:5      %i läuft eigentlich von 0:4

        B(j,i)=(factorial(n)/(factorial(i-1)*factorial(n-i+1)))*((j-1)/100)^(i-1)*
        (1-(j-1)/100)^(n-i+1);

    end

end

for j=1:101

    Bx(j)=0;
    By(j)=0;

    for a=1:(n+1)

        Bx(j)=Bx(j)+P(a,1)*B(j,a);

        By(j)=By(j)+P(a,2)*B(j,a);

    end

end

plot(Bx,By,'red')

%*****
% veränderte Stützpunkte
% 2. Versuch

n=4; %Anzahl der Stützpunkte (n+1)=5

P=[0 0;0.025 0.8;0.08 0.96;0.15 0.99;1 1]; %Punkte P_2,P_3,P4 verändert

for j=1:101      %t:=(j-1)/100 Laufvariable

    for i=1:5      %i läuft eigentlich von 0:4

```

```

B(j,i)=(factorial(n)/(factorial(i-1)*factorial(n-i+1)))*((j-1)/100)^(i-
1)*(1-(j-1)/100)^(n-i+1);

end

end

for j=1:101

    Bx(j)=0;
    By(j)=0;

    for a=1:(n+1)

        Bx(j)=Bx(j)+P(a,1)*B(j,a);

        By(j)=By(j)+P(a,2)*B(j,a);

    end

end

hold on

grid on

plot(Bx,By,'blue')

%*****
% veränderte Stützpunkte
% 3. Versuch

n=4; %Anzahl der Stützpunkte (n+1)=5

P=[0 0;0.001 0.999;0.08 0.96;0.15 0.99;1 1]; %Punkte P_2,P_3,P4 verändert

for j=1:101      %t:=(j-1)/100 Laufvariable

    for i=1:5      %i läuft eigentlich von 0:4

        B(j,i)=(factorial(n)/(factorial(i-1)*factorial(n-i+1)))*((j-1)/100)^(i-
        1)*(1-(j-1)/100)^(n-i+1);

    end

end

for j=1:101

    Bx(j)=0;
    By(j)=0;

    for a=1:(n+1)

        Bx(j)=Bx(j)+P(a,1)*B(j,a);

```

```

    By(j)=By(j)+P(a,2)*B(j,a);

end

end

hold on

grid on

plot(Bx,By,'magenta')

%dazu Kennlinienverlauf nach Nyhuis und Wiendahl im Vergleich im Intervall
%[0,1]

C=1/4;      %CNorm-Wert=1/4

x1=1;
y1=1;

z=linspace(0,1,100);

for t=1:100

x(t)=z(t)

y(t)=y1*(-(1-z(t)^C)^(1/C)+1)

end

plot(x,y,'black');

*****
%Basisgleichung (Sigmoid Funktion) für Kennlinienverlauf

m=-1;      %im Intervall [0,1]  m...min; M...Max
M=1;

x1=0;      %damit nur positive Werte angezeigt werden
y1=0;

%*****
%(Graph [b] in Abbildung 24)
x2=0.1;    %Punkt durch welchen Graph geht P(0.1/0.9)
y2=0.9;

%zur Berechnung von Sigma
sigma=-log(2*M/(y2+M)-1)*(2*M)/x2;

z=linspace(0,1,100);

for i=1:100
    a(i)=m+(M-m)/(1+exp(-sigma*(z(i))/(M-m)));
end
plot(z,a,'green')

```

```

grid on    %Raster wird angezeigt

hold on    %in einem Fenster werden alle Graphen angezeigt

%*****
%(Graph [e] in Abbildung 24)
x2=0.2;    %Punkt durch welchen Kurve geht, wurde verändert
y2=0.8;    %(und damit Steigung des Graphen)  P(0.2/0.8)

%zur Bestimmung von Sigma
sigma=-log(2*M/(y2+M)-1)*(2*M)/x2;

z=linspace(0,1,100);

for i=1:100
    a(i)=m+(M-m)/(1+exp(-sigma*(z(i))/(M-m)));
end

plot(z,a,'red')

%*****
%(Graph [c] in Abbildung 24)
x2=0.08;   %P(0.08/0.70)
y2=0.70;

%zur Bestimmung von Sigma
sigma=-log(2*M/(y2+M)-1)*(2*M)/x2;

z=linspace(0,1,100);

for i=1:100
    a(i)=m+(M-m)/(1+exp(-sigma*(z(i))/(M-m)));
end

plot(z,a,'blue')

%*****
%(Graph [d] in Abbildung 24)
x2=0.15    %P(0.15/0.8)
y2=0.80

%zur Bestimmung von Sigma
sigma=-log(2*M/(y2+M)-1)*(2*M)/x2;

z=linspace(0,1,100);

for i=1:100
    a(i)=m+(M-m)/(1+exp(-sigma*(z(i))/(M-m)));
end

plot(z,a,'magenta')

%*****
%Kennlinienverlauf nach Nyhuis und Wiendahl im Bereich [0:1]
%(Graph [a] in Abbildung 24)

x1=1;
y1=1;

```

```

C=1/4;

z=linspace(0,1,100);

for t=1:100

x(t)=z(t)

y(t)=y1*(-(1-z(t)^C)^(1/C)+1)

end

plot(x,y,'yellow');

%*****
%Basisgleichung (Sigmoid Funktion) für Kennlinienverlauf im Intervall[0,10]

m=-1;          %im Intervall [0,1] m...min; M...Max; wobei min=-Max;
M=1;

x1=0;          %damit nur positive Werte angezeigt werden
y1=0;

grid on        %Raster wird angezeigt

hold on       %in einem Fenster werden alle Graphen angezeigt
%*****
%x2, y2 sind beliebig wählbar;

% z.B. x2=1; y2=0.8;

%(Graph [2] in Abbildung 25)

x2=1 %P(1/0.8)durch welchen Graph läuft; zur Anpassung der Kennlinie
y2=0.8

%zur Berechnung von Sigma
sigma=-log(2*M/(y2+M)-1)*(2*M)/x2;

z=linspace(0,10,100); %Graph läuft von [0,10]

for i=1:100
  a(i)=m+(M-m)/(1+exp(-sigma*(z(i))/(M-m)));
end

plot(z,a,'blue')

%*****

%(Graph [3] in Abbildung 25)

x2=0.95      %P(0.95/0.75)
y2=0.75

%zur Berechnung von Sigma
sigma=-log(2*M/(y2+M)-1)*(2*M)/x2;

```

```

z=linspace(0,10,100); %läuft von [0,10]

for i=1:100
    a(i)=m+(M-m)/(1+exp(-sigma*(z(i))/(M-m)));
end

plot(z,a,'green')

%*****

%Kennlinienverlauf nach Nyhuis und Wiendahl

%(Graph [1] in Abbildung 25)

C=1/4;      %CNorm-Wert=1/4
a1=10;     %Streckfaktor alpha a1=10

x1=1;
y1=1;

z=linspace(0,1,100);

for t=1:100

    x(t)=x1*(1-(1-z(t)^C)^(1/C))+a1*x1*z(t)

    y(t)=y1*(1-(1-z(t)^C)^(1/C))

end

axis equal;

plot(x,y,'red');

```

Anhang C<sup>754</sup>

| Losgrößenmodell  | Annahmen  | Zielfunktion  | Restriktionen bzw. Schwachstellen   | Lösungsverfahren  |
|--|---|---|---|---|
| <b>Klassisches Losgrößenmodell (EPQ)</b><br>(auch als Andler'sches Losgrößenmodell bezeichnet) | ein Produkt<br>stationäre Nachfrage D<br>endliche Produktionsgeschwindigkeit p<br>unbegrenzte Kapazität einer Ressource<br>einstufige Fertigung | $\text{Minimiere } C(q) = h \cdot \frac{q}{2} \cdot (1 - \rho) + s \cdot \frac{D}{q}$ <p>             h... Lagerkostensatz<br/>             s... Rüstkostensatz<br/>             D... stationäre Nachfrage<br/>             p... Produktionsgeschwindigkeit<br/>             C... Gesamtkosten<br/>             q... Losgröße<br/> <math>\rho = \frac{p}{D}</math>... durchschnittliche Lager- und Rüstkosten pro Periode           </p> <p> <b>optimale Losgröße:</b><br/> <math display="block">q_{opt} = \left( \frac{2 \cdot s \cdot D}{h \cdot (1 - \rho)} \right)^{1/2}</math> </p> | Ressource wird nicht betrachtet<br>keine Beachtung von Rüstkosten<br>bei mehreren Produkten kommt es zu Überlagerungen in den Produktionszeiträumen<br>Lösung liefert nicht realisierbare Produktionspläne<br>nur für Langfristbetrachtungen geeignet | Bildung der ersten Ableitung der Zielfunktion nach q und Nullsetzen |

<sup>754</sup> Vgl. und siehe dazu umfassend Tempelmeier et al. (2005), S. 193 ff.

| Losgrößenmodell  | Annahmen   | Zielfunktion   | Restriktionen bzw. Schwachstellen   | Lösungsverfahren   |
|--|--|--|---|--|
| <p><b>Klassisches Logrößen- und Reihenfolgemodell (ELSP)</b></p> | <p>mehrere Produkte k</p> <p>stationäre Nachfrage <math>D_k</math></p> <p>endliche Produktionsgeschwindigkeit <math>p_k</math></p> <p>Rüstzeit des Produktes k kann berücksichtigt werden</p> <p>eine Maschine, welche zu jedem Zeitpunkt nur durch ein Produkt belegt sein darf</p> <p>Produkte unterliegen gemeinsamer Produktionszykluszeit T</p> | <p>Minimiere <math>Z = \sum_{k=1}^K \left[ \frac{s_k}{T} + \frac{T \cdot d_k}{2} \cdot h_k \cdot (1 - \rho_k) \right]</math></p> <p>Ermittlung der einheitlichen Produktionszykluszeit T</p> $T_{opt} = \left( \frac{2 \cdot \sum_{k=1}^K s_k}{\sum_{k=1}^K h_k \cdot d_k \cdot (1 - \rho_k)} \right)^{\frac{1}{2}}$ <p><math>d_k</math> ... produktspezifische Bedarfsgeschwindigkeit</p> <p><b>optimale Losgröße:</b></p> $q_k = T_{opt} \cdot d_k \quad k = 1, 2, \dots, K$ | <p>beschreibt nur durchschnittliche Belastung und nicht die Belastung zu jedem Zeitpunkt</p> <p>stationäres Modell mit einer kontinuierlichen Zeitachse</p> | <p>Zielfunktion nach der gemeinsamen Produktionszykluszeit T ableiten und nullsetzen und mit stationärer Nachfragemenge multiplizieren</p> <p>mittels einfacher heuristischer Verfahren lösbar</p> |



| Losgrößenmodell   | Annahmen  | Zielfunktion  | Restriktionen bzw. Schwachstellen   | Lösungsverfahren  |
|---|---|---|---|---|
| <b>Dynamisches Einprodukt-Losgrößenmodell mit dynamischer Nachfrage und unbeschränkten Kapazitäten (SLULSP)</b><br>(auch als Wagner-Whitin-Modell bezeichnet) | ein Produkt<br><br>dynamische Nachfragemengen<br><br>keine Kapazitätsbeschränkungen<br><br>einstufige Fertigung | $\text{Minimiere } Z = \sum_{t=1}^T (h \cdot y_t + s \cdot \gamma_t)$ <p>unter den Nebenbedingungen:</p> $y_{t-1} + q_t - y_t = d_t \quad t = 1, 2, \dots, T$ $q_t - M \cdot \gamma_t \leq 0 \quad t = 1, 2, \dots, T$ $q_t \geq 0 \quad t = 1, 2, \dots, T$ $y_t \geq 0 \quad t = 1, 2, \dots, T$ $\gamma_t \in \{0, 1\} \quad t = 1, 2, \dots, T$ <p>wobei</p> <p><math>d_t</math>... Nettobedarfsmenge in Periode <math>t</math><br/> <math>h</math>... Lagerkostensatz<br/> <math>M</math>... große Zahl (<math>M</math> muß größer als die maximal mögliche Losgröße sein)<br/> <math>s</math>... Rüstkostensatz<br/> <math>t</math>... Länge des Planungszeitraums<br/> <math>q_t</math>... Losgröße in Periode <math>t</math><br/> <math>y_t</math>... Lagerbestand am Ende der Periode <math>t</math><br/> <math>\gamma_t</math>... binäre Rüstvariable</p> | aufgrund der Vernachlässigung der Kapazitäten ergeben sich in der Regel nicht durchführbare Produktionspläne<br><br>manuelle Überplanung erforderlich | durch Rückführung auf kürzestes Weg-Problem in Netzwerken exakt lösbar<br><br><u>mittels heuristischer Verfahren:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verfahren von Silver und Meal</li> <li>• Verfahren von Groff</li> <li>• Stückkostenverfahren (Verfahren der gleitenden wirtschaftlichen Losgröße)</li> <li>• Stückperiodenausgleichsverfahren (Part-Period-Verfahren)</li> </ul> |

| Losgrößenmodell  | Annahmen  | Zielfunktion  | Restriktionen bzw. Schwachstellen     | Lösungsverfahren                         |
|--|---|---|---------------------------------------|--|
| <b>Dynamisches Losgrößen- und Reihenfolgemodell (PLSP)</b> | mehrere Produkte k  | Minimiere $Z = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (s_k \cdot y_{kt} + h_k \cdot z_{kt})$   | maximal ein Umrüstvorgang pro Periode | heuristisches Lösungsverfahren von Haase |
|  | dynamische Nachfragemengen  | unter den Nebenbedingungen<br>$y_{k,t-1} + q_{kt} - y_{kt} = d_{kt} \quad k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T$   | nur eine Maschine betrachtet          |  |
|  | eine Maschine   | $\sum_{k=1}^K (t b_k \cdot q_{kt} + t r_k \cdot y_{kt}) \leq b_t \quad t = 1, 2, \dots, T$  |                                       |  |
|  | endliche Produktionsgeschwindigkeit   | $\sum_{k=1}^K z_{kt} = 1 \quad t = 1, 2, \dots, T$  |                                       |  |
|  | in einer Periode kann höchstens ein Produktwechsel erfolgen (Small-Bucket-Modell) | $y_{kt} \geq z_{kt} - z_{k,t-1} \quad k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T$<br>$q_{kt} \leq M \cdot (z_{k,t-1} + z_{kt}) \quad k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T$<br>$q_{kt} \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T$<br>$z_{kt} \in \{0, 1\} \quad k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T$  |                                       |  |
|  | Übernahme des Rüstzustandes aus Vorperiode  | $y_{kt} \in \{0, 1\} \quad k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T$  |                                       |  |
|  | einstufige Fertigung  | t ... Periodenindex<br>k ... Produktindex<br>$d_{kt}$ ... Primärbedarf des Produkts k in Periode t<br>$t b_k$ ... Produktionszeit pro ME des Produkts k<br>$t r_k$ ... Rüstzeit für Produkt k<br>$b_t$ ... Kapazität der Ressource in Periode t<br>$q_{kt}$ ... Produktionsmenge des Produkts k in Periode t<br>$y_{kt}$ ... Lagerbestand des Produkts k am Ende der Periode t<br>$Y_{kt}$ ... binäre Rüstvariable für Produkt k in Periode t<br>$Z_{kt}$ ... binäre Variable, die anzeigt, ob Ressource am Ende der Periode t für Produkt k gerüstet ist |                                       |  |

| Losgrößenmodell  | Annahmen  | Zielfunktion   | Restriktionen<br>bzw. Schwachstellen   | Lösungsverfahren  |
|--|---|--|--|---|
| <b>Dynamisches Mehrproduktmodell mit beschränkter Kapazität (CLSP)<sup>755</sup></b> | <p>mehrere Produkte k</p> <p>dynamische Nachfragemengen</p> <p>eine Maschine</p> <p>endliche Produktionsgeschwindigkeit, d.h. für jedes Produkt wird eine Stückbearbeitungszeit vorgegeben</p> <p>in einer Periode kann höchstens ein Produktwechsel erfolgen (Small-Bucket-Modell)</p> <p>Übernahme des Rüstzustandes aus Vorperiode</p> <p>einstufige Fertigung</p> | <p>Minimiere <math>Z = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (s_k \cdot y_{kt} + h_k \cdot y_{kt})</math></p> <p>unter den Nebenbedingungen:</p> $y_{k,t-1} + q_{kt} - y_{kt} = d_{kt} \quad k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T$ $\sum_{k \in K_j} (t b_k \cdot q_{kt} + t r_k \cdot y_{kt}) \leq b_{jt} \quad j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T$ $q_{kt} - M \cdot y_{kt} \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T$ $q_{kt}, y_{kt} \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T$ $y_{kt} \in \{0, 1\} \quad k = 1, 2, \dots, K; t = 1, 2, \dots, T$ <p>wobei</p> <p>t ... Periodenindex, k ... Produktindex, j ... Ressourcenindex</p> <p>K<sub>j</sub> ... Menge der Produkte, die an Ressource j bearbeitet werden</p> <p>d<sub>kt</sub> ... Primärbedarf des Produkts k in Periode t</p> <p>t<sub>bk</sub> ... Produktionszeit pro ME des Produkts k</p> <p>t<sub>rk</sub> ... Rüstzeit für Produkt k</p> <p>b<sub>jt</sub> ... Kapazität der Ressource j in Periode t</p> <p>q<sub>kt</sub> ... Produktionsmenge des Produkts k in Periode t</p> <p>y<sub>kt</sub> ... Lagerbestand des Produkts k am Ende der Periode t</p> <p>Y<sub>kt</sub> ... binäre Rüstvariable für Produkt k in Periode t</p> | <p>berücksichtigt keine Reihenfolge innerhalb der Produktion</p> <p>nur auf eine Maschine begrenzt</p> | <p>mittels Standard-Software zur mathematischen Optimierung</p> <p>exakt lösbar</p> |

<sup>755</sup> Auf die Losgrößenmodelle DLSP, CLSD, CLSP-L wurde nicht explizit eingegangen, da diese leicht modifizierte Modelle des CLSP darstellen: Das Modell DLSP unterscheidet sich vom CLSP in der Nebenbedingung  $q_{kt} - M \cdot y_{kt} = 0$ ; das Modell CLSD berücksichtigt reihenfolgeabhängige Rüstzeiten und das CLSP-L Modell ist dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Produkte in einer Periode produziert werden können (Big-Bucket-Modell).

## Anhang D

**Auszug Auswertung - Literatur Einflussfaktoren/hybrides Produktionssystem:** Aus der Literatur gingen der *Produktmix*, das *Produktionslos*, der *Umstellaufwand* und die *Anlagenverfügbarkeit* als wesentliche Einflussfaktoren hervor.

**Tabelle 16: Auswertung der Literatur hinsichtlich Einflussfaktoren in hybriden Produktionssystemen<sup>756</sup>**

| Literaturquelle  | Einflussfaktor                       |
|--|--------------------------------------|
| A simulation-based comparison of batch sizes in a continuous processing industry <sup>757</sup>                  | Produktionslos                       |
| A model for level-loading production in the process industries when demand is stochastic <sup>758</sup>          | Produktionslos                       |
| Collaborative Process Automation Systems <sup>759</sup>  | Produktionslos/Produktmix            |
| Evaluating petroleum supply chain performance <sup>760</sup>   | Produktmix                           |
| A discussion of production planning approaches in the process industry <sup>761</sup>                            | Produktmix                           |
| Closed-loop control of a polymerisation plant using production performance indicators (PIs) <sup>762</sup>       | Anlagenverfügbarkeit                 |
| Asset life cycle management: towards improving physical asset performance in the process industry <sup>763</sup> | Anlagenverfügbarkeit                 |
| Some aspects of measuring maintenance performance in the process industry <sup>764</sup>                         | Anlagenverfügbarkeit                 |
| Product Development in Process Industry – Changes and consequences <sup>765</sup>                                | Anlagenverfügbarkeit/ Umstellaufwand |
| Revising the master production schedule in sequence dependent processes <sup>766</sup>                           | Umstellaufwand                       |
| Master production scheduling in capacitated sequence-dependent process industries <sup>767</sup>                 | Umstellaufwand                       |

<sup>756</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

<sup>757</sup> Siehe Mehra; Inman; Tuite (2006).

<sup>758</sup> Siehe Rappold; Yoho (2008).

<sup>759</sup> Siehe Hollender (2010), S. 335.

<sup>760</sup> Siehe Varma; Wadhwa; Seshmukh (2008).

<sup>761</sup> Siehe Crama; Pochet; Wera (2001);

<sup>762</sup> Siehe Zorut; Jovan; Gradišar; Mušič (2009).

<sup>763</sup> Siehe Schuman; Brent (2005).

<sup>764</sup> Siehe Arts; Knapp; Mann Jr. (1995).

<sup>765</sup> Siehe Chronéer (2005).

<sup>766</sup> Siehe Hill; Berry; Schilling (2003);

<sup>767</sup> Siehe Hill; Berry; Keong Leong; Schilling (2000).

Weiters wurde zur Bestimmung der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Logistikleistung und -kosten in einem hybriden Produktionssystem eine Expertenbefragung (siehe unten Expertenbefragung II) mit Verantwortlichen<sup>768 769</sup> der Produktionsplanung und -steuerung in Unternehmen mit Hybridfertigung durchgeführt, um den Vergleich zwischen den aus der Literatur hervorgehenden Einflussfaktoren und der durch Expertengespräche ermittelten Faktoren anstellen zu können:

|   |
|---|
| <p><b><u>EXPERTENBEFRAGUNG II</u></b></p> <p><b>Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Logistikleistung und -kosten in einem hybriden Produktionssystem</b></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p><b>Unternehmen und Ansprechperson:</b><br/> <b>Branche:</b><br/> <b>Datum:</b></p> </div> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bitte geben Sie eine Kurzbeschreibung Ihres Produktionsablaufs.</li> <li>2. Wo in Ihrer Produktion befindet sich die Schnittstelle bzw. der Übergang zwischen der Stoffumwandlung und der Stoffumformung?</li> <li>3. Durch welche internen und externen Faktoren werden die Logistikleistung und -kosten in Ihrem Unternehmen am wesentlichsten bestimmt bzw. beeinflusst?</li> <li>4. Bitte geben Sie die wesentlichen Produktionskennzahlen Ihres Unternehmens an (Reihung nach Priorität).</li> <li>5. Welche (und warum) der vier „klassischen“ Zielgrößen (Termintreue, Auslastung, Durchlaufzeit und Bestände) sind für Sie am relevantesten und werden im Zuge der Produktionsplanung und -steuerung fokussiert?</li> </ol> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">1-1</p> |
|---|

Im Nachfolgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Expertengespräche erläutert: Der Zielgröße *Auslastung* wird aufgrund des Einsatzes kapitalintensiver Aggregate laut der durchgeführten Expertengespräche die höchste Priorität zugewiesen (siehe Abbildung 137). Als weitere wesentliche Einflussfaktoren bzw. Zielgrößen konnten die *Produktionslosgröße*, der *Umstellaufwand*, die *Anlagenverfügbarkeit* und die *Variantenvielfalt/Nachfrage*, d.h. der zu

<sup>768</sup> Unternehmen und Gesprächspartner sind dem Lehrstuhl für Industrielogistik bekannt.

<sup>769</sup> Gesprächsprotokolle liegen am Lehrstuhl für Industrielogistik auf.

erzeugende *Produktmix* identifiziert werden (siehe dazu Abbildung 138). Dies konnte auch durch die durchgeführte Literaturrecherche bestätigt werden (siehe dazu Tabelle 16).

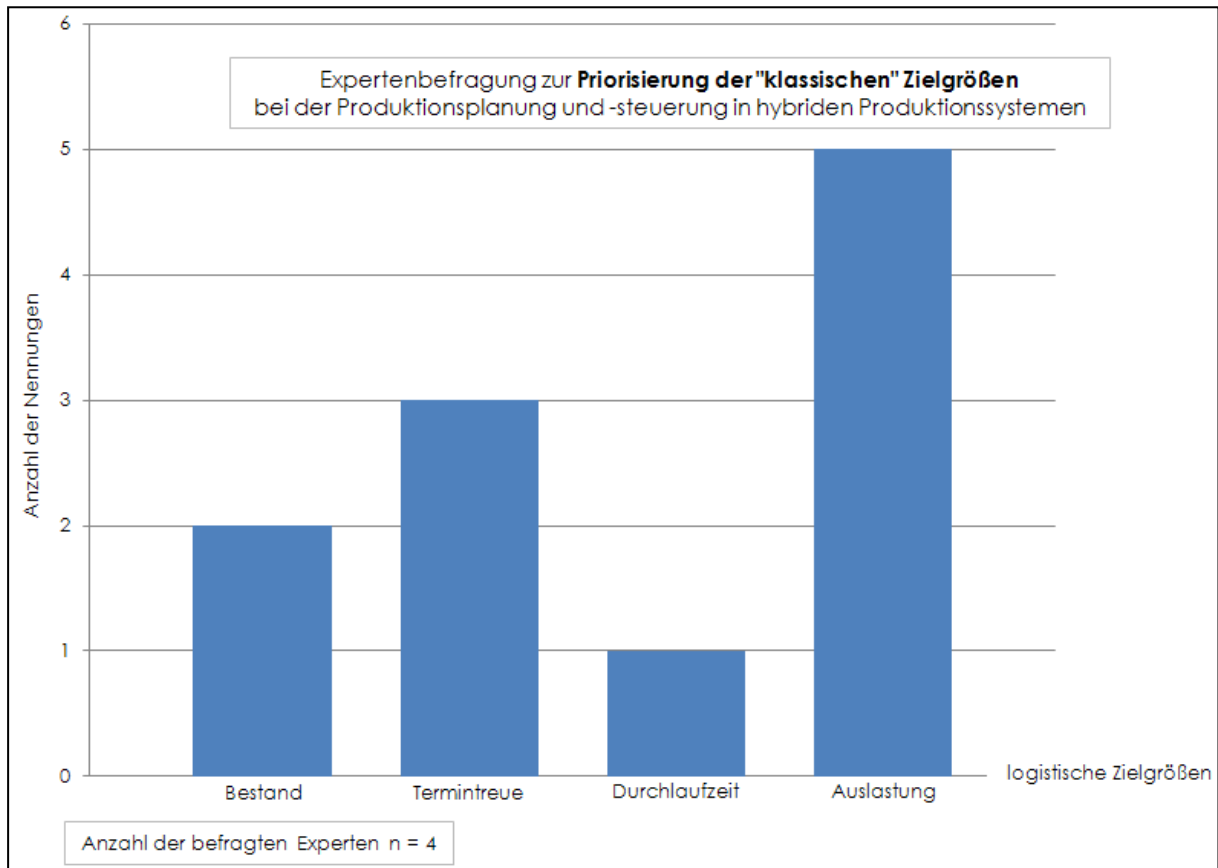
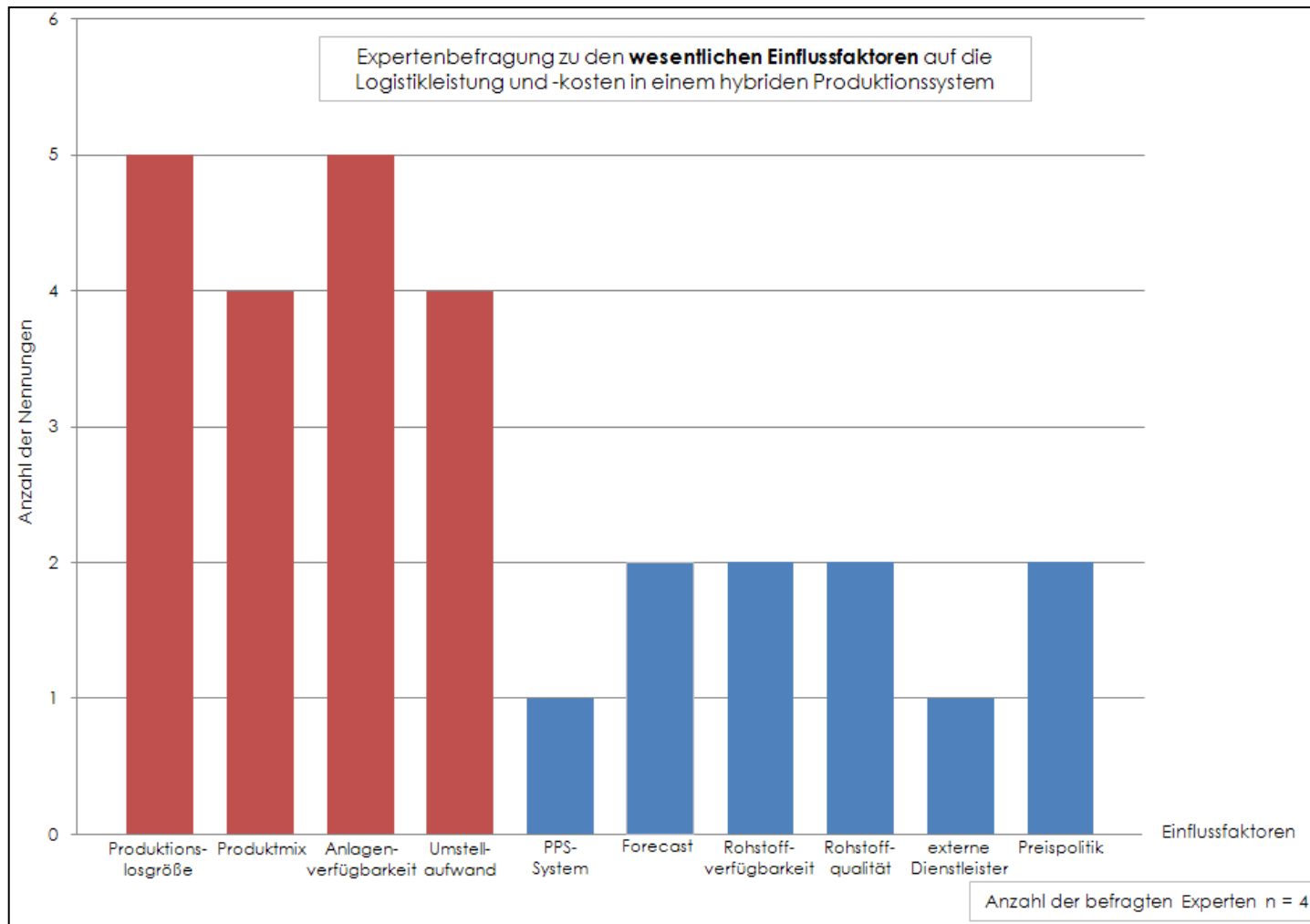


Abbildung 137: Ergebnis Expertenbefragung I<sup>770</sup>

<sup>770</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

Abbildung 138: Ergebnis Expertenbefragung II<sup>771</sup>

<sup>771</sup> Eigene Darstellung der Verfasserin.

## Anhang E

**Gesprächsprotokoll 1:**                    **Situationserhebung - Subsystem Gießerei**  
 Gesprächspartner:                    **Betriebsleiter Gießerei und Platzbetriebe<sup>772</sup>**  
 Datum:                                        **28.02.2012**

---

**1) Bitte erläutern Sie im Detail den Vorgang der Produktionsprogrammplanung (Losgröße, Chargen- und Auftragsreihenfolgeplanung) in der Gießerei.**

Auf Basis der eingegangenen Kundenaufträge wird eine Auftragsliste für die Gießerei (für den nächsten Monat) erstellt. Die Produktionsprogrammplanung, d.h. die Produktionslosgrößen bzw. Chargengrößen sowie die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge wird auf Basis dieser Liste manuell erstellt. Dabei wird versucht möglichst große Lose der gleichen Qualität unter Berücksichtigung der gewünschten Liefertermine zusammenzustellen. Berücksichtigung hat dabei die Tatsache zu finden, dass manche Qualitäten eine spezielle Vorbereitung bei den Öfen benötigen.

**2) Welche Schwachstellen weist die Produktionsprogrammplanung Ihrer Meinung nach im Moment auf?**

Das Produktionsprogramm wird manuell und auf Erfahrungswerte beruhend, erstellt. Es wird kein Programm verwendet, welches eine automatisierte Produktionsprogrammplanung ermöglicht bzw. zur Entscheidungsunterstützung herangezogen werden kann.

**3) Wo sehen Sie die größten Verbesserungspotenziale bezgl. der Produktionsprogrammplanung?**

Es sollte eine möglichst hohe Auslastung und eine längere Vorlaufzeit (ca. 3 bis 4 Wochen) erreicht werden, um flexibler auf kurzfristige Kundenwünsche reagieren zu können.

**4) Welche Zielgröße (Bestände, Liefertreue, Auslastung, Durchlaufzeit, Herstellkosten etc.) sind für Sie in der Gießerei am relevantesten?**

Die Herstellkosten sind die relevanteste Zielgröße. Daher liegen diese auch im primären Fokus der Betrachtung bei der Produktionslos- bzw. Chargengrößen- und Auftragsreihenfolgeplanung.

**5) Wie werden die in 4) angeführten Zielgrößen aktuell gemessen und überwacht?**

Die Herstellkosten der gesamten Gießerei werden zwar über ein PPS-System exakt erfasst, jedoch existiert keine genaue Zuordnung für die verschiedenen Qualitäten und Abmessungen.

**6) Gibt es weitere Zielgrößen, die Sie zukünftig überwachen möchten?**

Die Fertigungsbestände können immer aktuell abgefragt werden, die Ermittlung der Auslastung und Herstellkosten erfolgt monatlich. Die Liefertreue wird vom Versand überprüft und gegebenenfalls eingemahnt. Eine gleichmäßige Überwachung aller Zielgrößen wäre sinnvoll.

---

<sup>772</sup> Unternehmen und Gesprächspartner sind dem Lehrstuhl für Industrielogistik bekannt.



|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| <b><u>Gesprächsprotokoll 2:</u></b> | <b>Situationserhebung - Subsystem Gießerei</b>   |
| Gesprächspartner:                   | <b>Leiter Abteilung Forschung und Entwicklung, Qualitätsmanagement der Kupferhütte<sup>773</sup></b> |
| Datum:                              | <b>02.03.2012</b>  |

---

**1) Bitte erläutern Sie im Detail den Vorgang der Produktionsprogrammplanung (Losgröße, Chargen- und Auftragsreihenfolgeplanung) in der Gießerei.**

Bei der Produktionsprogrammplanung wird versucht, um einen möglichst hohen Durchsatz und eine hohe Auslastung zu erzielen, die Schmelz- und Gießleistung der Aggregate aufeinander abzustimmen bzw. anzupassen. In der Regel erfolgt das gleichzeitige Schmelzen und Gießen aufgrund der folgenden Parameter:

- Schmelzleistung der Öfen
- Gießleistung als f (Qualität, Durchmesser)
- Abstimmung, wenn zwei Öfen auf einer Anlage abgießen
- nutzbare Gießlänge als f(herzustellende Länge, Qualität)
- Kreislauf f(Durchmesser, Qualität, Länge)

Die Produktionslosgrößen wechseln oft, wenn Probleme auftauchen bzw. ein Eilauftrag kurzfristig ins System eingelastet werden muss.

Bei der Produktionsprogrammplanung müssen nachfolgende Restriktionen beachtet werden:

- Qualitäten, wie beispielsweise OF101, welche eine spezielle Vorbereitung und somit Vorlaufzeiten (Einfahrdauer der Öfen) benötigen, da die Verunreinigungen und der Phosphoranteil sehr gering sein müssen.
- Nach der Produktion von Qualitäten mit höherem Ag- oder P-Gehalt müssen die Öfen herunterlegiert werden.
- In der Regel können zur Herstellung der Qualitäten nur bestimmte Öfen, abhängig vom Grad der Verunreinigungen der Öfen bzw. deren Verfügbarkeit, verwendet werden.

**2) Welche Schwachstellen weist die Produktionsprogrammplanung Ihrer Meinung nach im Moment auf?**

Das derzeitige Produktionsprogramm weist sehr viele Produktionsunterbrechungen, bedingt durch zahlreiche Rüst- und Umstellvorgänge im Produktionsablauf auf. Fallweise ist das benötigte Einsatzmaterial nicht ausreichend auf Lager.

Weiters wird die Produktionsprogrammplanung manuell durch den Betriebsleiter oder einen Meister erstellt, wodurch dieser Vorgang kaum dokumentiert ist und lediglich auf Erfahrungswerten beruht.

Die tatsächlich anfallenden Kosten pro Tonne je Qualität sowie die Produktionseinflussfaktoren sind unzureichend dokumentiert und daher kaum bekannt.

**3) Wo sehen Sie die größten Verbesserungspotenziale bezgl. der Produktionsprogrammplanung?**

Die größten Verbesserungspotenziale liegen in der Schaffung einer nachvollziehbaren Produktionsprogrammplanung, der Ermittlung der anfallenden Kosten pro Tonne sowie

---

<sup>773</sup> Unternehmen und Gesprächspartner sind dem Lehrstuhl für Industriellistik bekannt.

die Darstellung der das Leistungsverhalten und die anfallenden Kosten in der Gießerei beeinflussenden Faktoren. Ebenso interessant und notwendig ist die Ermittlung der Qualitäts- und Prüfkosten je Tonne.

**4) Welche Zielgröße (Bestände, Liefertreue, Auslastung, Durchlaufzeit, Herstellkosten etc.) sind für Sie in der Gießerei am relevantesten?**

Die Kosten je Tonne in Abhängigkeit von Qualität, Durchmesser, Länge und Losgröße, die auf die Auftragslage angepasste Auslastung der Gießerei, die Liefertreue sowie eine möglichst hohe Flexibilität zur raschen Reaktion sowie die Lagerkosten.

**5) Wie werden die in 4) angeführten Zielgrößen aktuell gemessen und überwacht?**

Aktuell werden die Kosten je Tonne nicht gemessen und überwacht. Ebenso wird nur versucht durch die zeitverzögerte Anpassung des Schichtmodells die Auslastung des Systems zu regeln, die Termintreue der Gießerei wird nicht erhoben und auch die Lagerkosten sind nicht bekannt.

**6) Gibt es weitere Zielgrößen, die Sie zukünftig überwachen möchten?**

----

## Anhang F

```
% Kennlinienanpassung an mittlere kumulierte Leistungsdaten [t/h] aus
% Simulation durch Polynomregression 2. Ordnung
```

```
t=(0:1:25)'; %schrittweise transponiert
```

```
% Koeffizientenmatrix A:
```

```
A(:,1)=zeros(size(t));
```

```
A(:,2)=t;
```

```
A(:,3)=t.^2;
```

```
%kumulierte Leistungsdaten aus Simulation (Datensatz 1: März 2011)
```

```
y=[ 0.00
    3.81
    14.24
    27.08
    40.64
    54.22
    68.33
    82.75
    97.98
    113.36
    129.06
    145.40
    161.75
    178.13
    194.68
    211.44
    228.32
    245.26
    262.21
    279.18
    296.16
    313.12
    329.96
    346.51
    362.76
    378.66];
```

```
%Lösen mit QR-Zerlegung:
```

```
%Regressionskoeffizient a
```

```
a=A\y;
```

```
%Lösen mit Singulärwertzerlegung (SVD):
```

```
b=pinv(A)*y;
```

```
% Schätzpunkte bestimmen:
```

```
yQRDach=A*a;
```

```
ySVDDach=A*b;
```

```
%Ergebnisse darstellen:  
  
plot(t, y, 'red') %Kennlinie mit Simulationswerten  
  
hold on  
  
plot(t, ySVDDach, 'blue') % Kennlinie durch Polynomregression 2.Ordnung
```