

Hierarchisches Planungsmodell zur Bestimmung der Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik bei unterschiedlichen Gleichteilstrategien

Dissertation

Marcel Helmdach

1. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier

HEINZ NIXDORF INSTITUT

Universität Paderborn

Wirtschaftsinformatik, insbesondere CIM

2. Gutachter:

Prof. Dr. Leena Suhl

DSOR Lab

Universität Paderborn

Wirtschaftsinformatik

Paderborn, März 2011

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn, der International Graduate School „Dynamic Intelligent Systems“ und dem Forschungszentrum der Daimler AG in Ulm.

Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier danke ich sehr herzlich für die engagierte wissenschaftliche Betreuung, für seinen fachlichen Rat und für die vielen anregenden Diskussionen, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit sehr geholfen haben. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Leena Suhl für die Übernahme des Zweitgutachtens und für die hilfreichen Ratschläge, mit denen sie mich während meiner Promotionszeit unterstützt hat.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier, der International Graduate School „Dynamic Intelligent Systems“ der Universität Paderborn und der Daimler AG für die Möglichkeit, in einem Industrieunternehmen promovieren zu können. Dies ermöglichte es mir, die entwickelten wissenschaftlichen Methoden in der Praxis anzuwenden und neben meiner wissenschaftlichen Arbeit erste Einblicke in ein erfolgreiches deutsches Großunternehmen gewinnen zu können.

Ich bedanke mich bei der Daimler AG und insbesondere bei meinen Centerleitern Herrn Prof. Dr. Heinrich Flegel und Herrn Dr. Stefan Kienzle, meinen Abteilungsleitern Herrn Dr. Gerhard Jünemann und Herrn Dr. Thomas Pantleon, meinem Teamleiter Herrn Dr. Thomas Sommer-Dittrich sowie meinem Teilprojektleiter Herrn Dr. Klaus Fürderer für die Möglichkeit, viele interessante Projekte bearbeiten und damit mein Wissen und meine Fähigkeiten erweitern zu können. Außerdem möchte ich mich bei allen Projektpartnern, insbesondere bei Frau Estelle Parent, bei Herrn Thomas Stark und bei Frau Heike Raatz für die erfolgreiche Zeit bei der Daimler AG bedanken.

Den Kollegen am Daimler Forschungszentrum Ulm und in der Arbeitsgruppe Wirtschaftsinformatik, insb. CIM danke ich für die gute Zusammenarbeit und die hilfreichen Diskussionen. Besonders danken möchte ich dabei den Kollegen der Paderborner Doktorandenklasse Dr. Simon Altemeier, Dr. Jan Erik Gans, Joachim Grüner, Dr. Jens Peter Kempkes, Tim Schöneberg, Thomas Siebers, Kostja Siefen und Dr. Thomas Sillekens.

Dank sagen möchte ich auch den zahlreichen Studenten, insbesondere Andreas Dette, Philipp Hertz, Oliver Schenk, und André Häußler, die mich mit guten Ideen und viel Einsatz beim Erstellen der Arbeit unterstützt haben.

Unverzichtbar für das Gelingen der Dissertation war die Unterstützung aus meinem privaten Umfeld. Dabei möchte ich mich bei meinen Eltern dafür bedanken, dass sie mir meine wissenschaftliche Ausbildung ermöglicht und mich dabei immer unterstützt haben. Daneben danke ich meiner Familie sowie meinem Freundeskreis für den Rückhalt, die Motivation und die notwendigen Ablenkungen. Besonders danken möchte ich meiner Freundin Doro für ihre Geduld und ihren Rückhalt während der schwierigen Phasen beim Erstellen der Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Problembeschreibung	3
2.1	Beschreibung des Betrachtungsgegenstands	3
2.1.1	Herstellkosten in Produktion und Logistik	3
2.1.1.1	Definition der Herstellkosten.....	3
2.1.1.2	Herstellkosten in der Produktion	4
2.1.1.3	Herstellkosten in der Logistik.....	5
2.1.2	Variantenabhängige Kosten in Produktion und Logistik.....	10
2.1.2.1	Variantenabhängige Kosten in der Produktion	11
2.1.2.2	Variantenabhängige Kosten in der Logistik	18
2.2	Gleichteilestrategien bei variantenreichen Serienprodukten	20
2.3	Anforderungen an ein Planungsmodell zur Bestimmung der Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik bei unterschiedlichen Gleichteilestrategien	21
2.3.1	Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks.....	23
2.3.2	Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung	26
2.3.3	Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik	27
3	Stand der Forschung.....	29
3.1	Stand der Forschung bei Verfahren zur Bewertung von Gleichteilestrategien	29
3.1.1	Bewertung von Gleichteilestrategien mit dem Fokus auf den Sicherheitsbestandskosten	29
3.1.2	Bewertung von Gleichteilestrategien an einem Produktionsstandort	30
3.1.3	Bewertung der Herstellkosten im Produktions- und Transportnetzwerk.....	32
3.1.4	Zusammenfassung	34
3.2	Stand der Forschung bei der Strukturierung- und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks.....	35
3.2.1	Auswahl von Produktionskonzepten und Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen	35
3.2.2	Make-or-Buy Entscheidung und Auswahl der Zulieferer	40
3.2.3	Optimierung des Transportnetzwerks.....	42
3.3	Stand der Forschung bei der Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung	46
3.3.1	Verfahren zur Strukturierung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung	47
3.3.2	Austaktung und Simulation der Arbeitssysteme mit Fließlinienfertigung zur Bestimmung der notwendigen Arbeitskräfte	49
3.4	Stand der Forschung bei der Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik	51
4	Zu leistende Arbeit.....	53
4.1	Erstellung von Planungsmodellen und –verfahren.....	53
4.2	Erstellung eines hierarchischen Vorgehens	54

5	Hierarchisches Planungsmodell zur Bestimmung der Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik bei unterschiedlichen Gleichteilestrategien ..	55
5.1	Beschreibung der Modelle und Verfahren	55
5.1.1	Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks	55
5.1.1.1	Modell für die Make-or-Buy Entscheidung und die Auswahl der Zulieferer	56
5.1.1.2	Modell zur Auswahl der Produktionskonzepte und zur Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen	57
5.1.1.3	Modell zur Lagerauswahl und –dimensionierung, zur Zuordnung von Operationen und zur Festlegung der Flussmengen	60
5.1.1.4	Modell zur Speditionsauswahl	63
5.1.2	Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung	66
5.1.2.1	Verfahren zur Strukturierung von Arbeitssystemen mit getakteter Fließfertigung.....	66
5.1.2.2	Austaktung und Simulation der Arbeitssysteme mit Fließlinienfertigung zur Bestimmung der notwendigen Arbeitskräfte	71
5.1.3	Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik	77
5.1.3.1	Modell zur Auswahl der Lagersysteme, zur Zuordnung von Operationen zu den Lagersystemen und zur Bestimmung der Transportflüsse durch das interne Netzwerk	78
5.1.3.2	Modell zur Auswahl der Transportsysteme und zur Zuordnung der Operationen zu Transportsystemen	82
5.2	Hierarchisches Vorgehen	86
5.2.1	Top-Down Vorgehen	86
5.2.1.1	Vorgehen zur Strukturierung- und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks	87
5.2.1.2	Vorgehen zur Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung	93
5.2.1.3	Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik	95
5.2.1.4	Bestimmung der Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik für eine Gleichteilestrategie	98
5.2.2	Rückkopplungen	98
6	Evaluation des Planungsmodells	105
6.1	Evaluation der Modelle zur Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks	105
6.1.1	Evaluation des Modells zur Make-or-Buy Entscheidung und zur Auswahl der Zulieferer	105
6.1.2	Evaluation des Modells zur Auswahl der Produktionskonzepte und zur Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen.....	108
6.1.3	Evaluation des Modells zur Lagerauswahl und –dimensionierung und zur Zuordnung von Operationen.....	113
6.1.4	Evaluation des Modells zur Speditionsauswahl.....	116
6.2	Evaluation der Methoden zur Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung.....	118
6.3	Evaluation der Modelle zur Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik	119
6.3.1	Evaluation des Modells zur Auswahl der Lagersysteme und zur Zuordnung von Operationen zu den Lagersystemen	119
6.3.2	Evaluation des Modells zur Auswahl von Transportsystemen und zur Zuordnung von Operationen zu den Transportsystemen.....	124

6.4	Zusammenfassende Bewertung.....	127
7	Fazit.....	129
7.1	Ergebnis der Arbeit.....	129
7.2	Ausblick.....	130
8	Literaturverzeichnis.....	133
	Anhang.....	141

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 3-1: Bewertung der Ansätze für Auswahl von Produktionskonzepten und Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen (1/2)</i>	39
<i>Tabelle 3-2: Bewertung der Ansätze für Auswahl von Produktionskonzepten und Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen (2/2)</i>	39
<i>Tabelle 3-3: Bewertung der Ansätze für die Make-or-Buy Entscheidung und die Lieferantenauswahl</i>	41
<i>Tabelle 3-4: Bewertung der Ansätze für die Optimierung des Transportnetzwerks (1/2)</i>	45
<i>Tabelle 3-5: Bewertung der Ansätze für die Optimierung des Transportnetzwerks (2/2)</i>	46
<i>Tabelle 3-6: Bewertung der Ansätze für die Strukturierung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung</i>	48
<i>Tabelle 3-7: Bewertung der Ansätze für die Austaktung und Simulation von Fließlinien (1/2)</i>	51
<i>Tabelle 3-8: Bewertung der Ansätze für die Austaktung und Simulation von Fließlinien (2/2)</i>	51
<i>Tabelle 6-1: Mögliche Lieferanten für ausgewählte Komponenten (Einkaufspreise in Klammern)</i>	106
<i>Tabelle 6-2: Nachfragemenge für ausgewählte Komponenten (Summe über alle Perioden)</i>	106
<i>Tabelle 6-3: Kosten, Rabattstufen und Kapazitäten der Zulieferer</i>	107
<i>Tabelle 6-4: Transportkosten für Komponente eins</i>	107
<i>Tabelle 6-5: Ergebnis der Optimierung mit dem Modell „Make-or-Buy Entscheidung und Auswahl der Zulieferer“</i>	108
<i>Tabelle 6-6: Stücklistenstruktur für End- (EP) und Zwischenprodukte (ZP)</i>	109
<i>Tabelle 6-7: Nachfrage nach Endprodukten</i>	109
<i>Tabelle 6-8: Kapazitäten und Kosten für Produktionskonzepte zur Herstellung der Endprodukte in Kapazitätsstufe 1</i>	110
<i>Tabelle 6-9: Kapazitätsbedarf, variable Kosten und Rüst- bzw. Losanlaufverluste</i> ..	111
<i>Tabelle 6-10: Produktzuordnungskosten für Endprodukte</i>	111
<i>Tabelle 6-11: Exemplarische Distributionskosten für Endprodukte</i>	111
<i>Tabelle 6-12: Ergebnisse für das Modell „Produktionsnetzwerk“</i>	112
<i>Tabelle 6-13: Mögliche Lagerstandort inkl. Kapazitäten und Kosten für Kapazitätsstufe 1 (ohne Zuliefererlager)</i>	114
<i>Tabelle 6-14: Operationen inkl. Kapazitäten und Kosten für die vom Unternehmen betriebenen LLZ</i>	114
<i>Tabelle 6-15: Genutzte Lager und zugeordnete Operationen und Produkte</i>	115
<i>Tabelle 6-16: Transportmengen und Transportfrequenzen für 5 Komponenten zu Produktionsstandort 5</i>	116
<i>Tabelle 6-17: Speditionen inkl. Kapazitäten und Fix- sowie Einmalkosten</i>	117
<i>Tabelle 6-18: Kapazitätsbedarf und variable Transportkosten für fünf Komponenten auf je einer Kante mit der externen Spedition 1</i>	117
<i>Tabelle 6-19: Genutzte Speditionen inkl. Kapazitätsstufe/Anzahl TM und zugeordnete Komponenten</i>	118

<i>Tabelle 6-20: Anzahl Operationsdurchführungen für ein Vor-, ein Zwischen- und ein Endprodukt (Summe über alle Perioden)</i>	<i>121</i>
<i>Tabelle 6-21: Kosten und Kapazitäten für das Lagern von Produkte der Lagersysteme</i>	<i>122</i>
<i>Tabelle 6-22: Kosten und Kapazitäten für die Operationen Eingangskontrolle (E), Sequenzierung (S) und Qualitätskontrolle (Q)</i>	<i>122</i>
<i>Tabelle 6-23: Transportwege und –mengen für drei beispielhafte Komponenten</i>	<i>123</i>
<i>Tabelle 6-24: Transportsystem inkl. Kapazitäten und Kosten</i>	<i>124</i>
<i>Tabelle 6-25: Mögliche Routen inkl. Fahrzeit und Kosten</i>	<i>125</i>
<i>Tabelle 6-26: variable Transportkosten für fünf Komponenten auf je zwei Transportsystemen</i>	<i>126</i>

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 2-1: Losanlaufkosten aufgrund von Minderleistung nach dem Rüsten nach Köhler [Köh88]</i>	12
<i>Abbildung 2-2: Beispiel eines Abschnitts einer Fließlinie</i>	13
<i>Abbildung 2-3: Ungünstiger Driftverlauf eines Arbeiters mit notwendigem Springereinsatz bei Fahrzeug IV (Darstellung nach Altemeier et al. [AHD10])</i>	15
<i>Abbildung 2-4: Exemplarisches Beispiel zur Berechnung der variantenabhängigen Einkaufskosten</i>	18
<i>Abbildung 2-5: Beispiel für unterschiedliche Gleichteilestrategien (links ohne Gleichteile, Mitte und rechts mit unterschiedlichen Gleichteilen)....</i>	21
<i>Abbildung 5-1: Algorithmus zur Verteilung der Aufträge auf die Cluster [Gan09] ..</i>	69
<i>Abbildung 5-2: Algorithmus zur Auftragsverschiebung [Gan09]</i>	70
<i>Abbildung 5-3: Algorithmus zur mehrfachen Auftragsverschiebung [Gan09].....</i>	71
<i>Abbildung 5-4: Beispielhafte Veränderung der Arbeitsbelastungen auf einem Arbeitsplatz beim Tausch zweier AVos nach [AHD10]</i>	75
<i>Abbildung 5-5: Schematische Darstellung des hierarchischen Vorgehens</i>	87
<i>Abbildung 5-6: Input und Output für das „Modell für die Make-or-Buy Entscheidung und die Auswahl der Zulieferer“</i>	88
<i>Abbildung 5-7: Input und Output für das „Modell zur Auswahl der Produktionskonzepte und zur Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen“</i>	89
<i>Abbildung 5-8: Input und Output für das Modell „Lagerauswahl und -dimensionierung“</i>	92
<i>Abbildung 5-9: Input und Output für das Modell „Speditionsauswahl“</i>	93
<i>Abbildung 5-10: Input und Output für das Verfahren „Neuplanung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen“</i>	94
<i>Abbildung 5-11: Input und Output für das Verfahren „Austaktung und Simulation der Fließmontagesysteme zur Bestimmung der notwendigen Arbeitskräfte“</i>	95
<i>Abbildung 5-12: Input und Output für das Modell „Lagersystemauswahl“</i>	96
<i>Abbildung 5-13: Input und Output für das Modell „Transportsystemauswahl“</i>	98
<i>Abbildung 5-14: Mögliche Rückkopplung im hierarchischen Planungsmodell.....</i>	99
<i>Abbildung 6-1: Nachfrage nach Endprodukten</i>	110
<i>Abbildung 6-2: Produktionsmenge und gewählte Kapazitätsstufen für Arbeitssystem 5</i>	112
<i>Abbildung 6-3: Transportmenge je Spedition</i>	118
<i>Abbildung 6-4: Schematische Darstellung des internen Produktionslogistiknetzwerks</i>	120
<i>Abbildung 6-5: Kostenoptimales internes Produktionslogistiknetzwerk</i>	123
<i>Abbildung 6-6: Kostenoptimale Auswahl der Transportsysteme und Routen.....</i>	126

1 Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist ein Planungsmodell, das es ermöglicht, die Vor- und Nachteile von Gleichteilestrategien in Produktion und Logistik bei variantenreichen Serienprodukten zu bewerten. Die Herstellkosten sollen dazu für unterschiedliche Gleichteilestrategien bestimmt und so die bestmögliche Strategie identifiziert werden.

In Kapitel 2 werden die für die Bestimmung der Herstellkosten bei variantenreichen Serienprodukten notwendigen Kostenarten sowie die Berechnungsvorschriften für die Kostenbestandteile beschrieben. Nach der Definition der Begriffe Gleichteil und Gleichteilestrategie werden die Anforderungen an ein Planungsmodell zur Bestimmung der Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik bei unterschiedlichen Gleichteilestrategien erläutert. In Kapitel 3 wird der Stand der Technik hinsichtlich der in Kapitel 2 erarbeiteten Anforderungen bewertet und für die Aufgabenstellung nutzbare Verfahren identifiziert. Kapitel 4 zeigt den Forschungsbedarf auf, der sich aus der Differenz der Anforderungen aus Kapitel 2 und den verwendbaren Verfahren aus Kapitel 3 ergibt. In Kapitel 5 wird dann das intendierte Planungsmodell erarbeitet; in Kapitel 6 erfolgt dessen Evaluation. Kapitel 7 zieht ein Fazit und zeigt weitere Forschungsmöglichkeiten auf.

2 Problembeschreibung

2.1 Beschreibung des Betrachtungsgegenstands

In diesem Abschnitt werden die für die Bestimmung der Herstellkosten bei variantenreichen Serienprodukten notwendigen Kostenarten sowie die Berechnungsvorschriften für die Kostenbestandteile beschrieben. Nach der Definition der Herstellkosten werden die Kostenarten der Herstellkosten in Produktion und Logistik erläutert und anschließend deren variantenabhängige Bestandteile identifiziert.

2.1.1 Herstellkosten in Produktion und Logistik

2.1.1.1 Definition der Herstellkosten

Herstellkosten¹ sind die Kosten für die Produktion einer Produkteinheit. Sie gliedern sich in Material- und Fertigungskosten. Die Materialkosten bestehen aus Materialeinzel- und Materialgemeinkosten, während sich die Fertigungskosten in Einzelkosten des Fertigungslohns, Fertigungsgemeinkosten und Sondereinzelkosten der Fertigung gliedern [SK03]. Zu den Materialeinzelkosten zählen Materialkosten, die sich direkt einem Produkt zuordnen lassen. Materialgemeinkosten werden „indirekt anhand von Bezugsgrößen im Sinne des Durchschnittsprinzips verrechnet“ [CFG07]. Die hierfür verwendete Methode ist die Zuschlagskalkulation, bei der die Materialgemeinkosten an Hand einer Bezugsgröße² auf die Produkte verteilt werden. Die Einzelkosten des Fertigungslohns sind alle Personalkosten, die sich direkt einem Produkt zuordnen lassen. Die Fertigungsgemeinkosten³ werden, wie die Materialgemeinkosten, den Produkten über eine Zuschlagskalkulation zugerechnet. Als Sondereinzelkosten der Fertigung⁴ werden all jene Kosten bezeichnet, die einem Auftrag, aber nicht einem einzelnen Produkt zuzuordnen sind [CFG07].

¹ Der Begriff „Herstellkosten“ stammt aus der Kosten- und Leistungsrechnung und ist das Ergebnis der Kostenträgerrechnung. Im Gegensatz zu den „Herstellungskosten“, die im Handels- und Steuerrecht benutzt werden, dienen die Herstellkosten zur Unterstützung von Managemententscheidungen [CFG07] [SK03].

² z.B. die Materialeinzelkosten, die Maschinen- bzw. Anlagenzeiten oder die Einzelkosten des Fertigungslohns

³ z.B. das Gehalt eines Meisters, der mehrere Verarbeitungszentren mit mehreren Produkten betreut oder

⁴ z.B. Spezialwerkzeuge und Lizenzen, die nicht nur für ein Produkt, sondern für eine Produktgruppe benutzt werden können

2.1.1.2 Herstellkosten in der Produktion

„Unter (industrieller) Produktion versteht man die Erzeugung von Ausbringungsgütern (Produkten) aus materiellen und nichtmateriellen Einsatzgütern (Produktionsfaktoren) nach bestimmten technischen Verfahrensweisen“ [TG05]. Ein Arbeitssystem wird als eine organisatorische Einheit definiert, in der jeweils ein einzelner Abschnitt eines Produktionsprozesses ausgeführt wird. Innerhalb eines Arbeitssystems findet ein Transformationsprozess von einem oder mehreren Inputfaktoren (Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe) in ein oder mehrere Outputfaktoren (End- und Zwischenprodukte) mit Hilfe der Produktionsfaktoren Mensch und Maschine statt [TG05]. Inputfaktoren können entweder zugekauft oder selber hergestellt werden. Die Kosten für zugekaufte Inputfaktoren entsprechen dem Einstandspreis⁵, während die Kosten der selbst erstellten Inputfaktoren über deren Herstellkosten ermittelt werden müssen. Die Materialgemeinkosten eines Arbeitssystems bestehen aus den Kosten für Materialien, die in dem Arbeitssystem in einem bestimmten Zeitraum verbraucht wurden und die nicht direkt einem Outputfaktor zuzuordnen sind⁶. Falls eine Zuordnung von Materialgemeinkosten auf einzelne Arbeitssysteme nicht möglich ist, erfolgt diese Zuordnung mit Hilfe einer Zuschlagskalkulation. Die Materialkosten eines Outputfaktors in einem Arbeitssystem berechnen sich aus der Menge der benötigten Inputfaktoren für eine Produkteinheit des Outputfaktors multipliziert mit dem Einstandspreis bzw. den Herstellkosten. Die Menge der direkt zuzuordnenden Inputfaktoren ergibt sich unmittelbar aus der zugrunde liegenden Erzeugnisstruktur. Die Menge der übrigen Inputfaktoren je Outputfaktor wird aus der Verbrauchsmenge des Inputfaktors im Arbeitssystem multipliziert mit dem jeweiligen Zuschlagsfaktor für eine Produkteinheit des Outputfaktors berechnet (2-1).

$$c_{il}^{MK-L} = \sum_{i \in I^n} c_i^I \cdot \left(d_{ii}^{Bom} + d_{il}^{I-L} \cdot \frac{u_{ii}^{ZS-I}}{d_{il}^{Out}} \right) \quad (2-1)$$

Die Einzelkosten des Fertigungslohns in einem Arbeitssystem berechnen sich aus der Vorgabezeit für die Arbeit an einem Outputfaktor multipliziert mit den Lohnkosten je Zeiteinheit für den entsprechenden Arbeiter [Göt10]. Die Fertigungsgemeinkosten bestehen aus den Personal- und den Maschinengemeinkosten. Zur Berechnung der Personalgemeinkosten für eine Produkteinheit eines Outputfaktors werden alle Arbeitszeiten, die sich nicht direkt einem Outputfaktor zurechnen lassen, addiert, mit den entsprechenden Lohnkosten je Zeiteinheit multipliziert und jedem Outputfaktor über einen Zuschlagsfaktor zugerechnet. Die Maschinengemeinkosten ergeben sich aus der Anzahl

⁵ Der Einstandspreis setzt sich aus dem Einkaufspreis abzüglich der Rabatte (z.B. Skonti) und den Transportkosten zusammen [Göt10]. Die Transportkosten werden in Abschnitt 2.1.1.3 näher erläutert.

⁶ z.B. der verbrauchte Strom

der Maschinen im Arbeitssystem multipliziert mit deren Kosten im Betrachtungszeitraum und einem Zuschlagsfaktor (2-2).

$$c_{il}^{FK-L} = \sum_q t_{ilq}^{AZ-D-I} \cdot \frac{c_q^{Lohn}}{t_q^{Q-BZ}} + \sum_q t_{ql}^{AZ-G} \cdot \frac{c_q^{Lohn}}{t_q^{Q-BZ}} \cdot \frac{u_{iq}^{ZS-Q}}{d_{il}^{Out}} + \sum_\rho c_\rho^P \cdot d_{l\rho}^{L-P} \cdot \frac{u_{\rho i}^{ZS-P}}{d_{il}^{Out}} \quad (2-2)$$

Die Herstellkosten eines Outputs in einem Arbeitssystem ergeben sich aus der Summe aus Materialkosten und Fertigungskosten (2-3).

$$c_{il}^{HK-L} = c_{il}^{MK-I} + c_{il}^{FK-I} \quad (2-3)$$

2.1.1.3 Herstellkosten in der Logistik

Die Aufgaben der Logistik bestehen aus dem Wareneinkauf und der Anlieferung der zugekauften Inputfaktoren an die Arbeitssysteme (Beschaffungslogistik), dem Transport von Faktoren zwischen den Arbeitssystemen (Produktionslogistik) und der Auslieferung der Endprodukte an die Kunden (Distributionslogistik) [TG05]. Die räumliche Struktur des Logistiksystems eines Unternehmens kann als Netzwerk betrachtet werden. Die Lieferanten, die Produktionsstandorte und die Kunden bzw. die Absatzmärkte werden in einem solchen Netzwerk durch Knoten repräsentiert. Die Lieferanten stellen Quellen dar, die die Inputfaktoren in das Netzwerk einspeisen. Produktionsstandorte, an denen sich ein oder mehrere Arbeitssysteme befinden, stellen gleichzeitig Senken für die Inputfaktoren und Quellen für die Outputfaktoren dar. Die Kunden bzw. Absatzmärkte repräsentieren die Senken des Netzwerks. Daneben gibt es in Unternehmensnetzwerken Lager, die sich zwischen den zuvor beschriebenen Knoten befinden können. Da in den Lagern kein Transformationsprozess stattfindet, stellen Lagerknoten weder Quellen noch Senken sondern lediglich Transitknoten dar. Zwischen den Knoten gibt es Kanten, auf denen die Input- und Outputfaktoren transportiert werden. Netzwerke, bei denen Produktionsstandorte lediglich als einzelne Knoten betrachtet werden, werden im Folgenden externe Unternehmensnetzwerke genannt.

Arbeitssysteme, Wareneingänge, Warenausgänge und Lager stellen Knoten in einem internen Standortnetzwerk dar. Wareneingangsknoten repräsentieren die Quellen des Netzwerks für extern angelieferte Inputfaktoren. Warenausgangsknoten stellen dementsprechend die Senken des Netzwerks dar. Wie die Produktionsstandortknoten des externen Unternehmensnetzwerks repräsentieren die Arbeitssysteme sowohl Senken für Inputfaktoren als auch Quellen für Outputfaktoren. Lager sind wiederum als Transitknoten anzusehen. Auch zwischen den Knoten des internen Standortnetzwerks gibt es Kanten, auf denen die Produkte transportiert werden.

In der Logistik fallen Kosten für den Einkauf von Komponenten, für Transporte, für die Lagerung und für zusätzliche fremdzuvergebende Operationen⁷ an. Bei fremdbeschafften Inputfaktoren fließt die Summe dieser Kosten als Einstandskosten über die Materialkosten in die Herstellkosten der Outputfaktoren ein⁸. Die Kosten für selbst erstellte Inputfaktoren ergeben sich entsprechend aus deren Herstellkosten in der Produktion und den zwischen den Arbeitssystemen anfallenden Kosten für Lagerung, Transport und zusätzliche Operationen (2-4). Die Herstellkosten eines Produkts in der Produktion werden aus den durchschnittlichen Herstellkosten des Produkts in allen Arbeitssystemen, in denen es hergestellt wird, berechnet (2-5).

$$c_i^I = \begin{cases} c_i^{ZK-I} + c_i^{TK-Int-I} + c_i^{TK-Ext-I} + c_i^{LK-I} + c_i^{OK-I} & , \text{wenn } i \in I^{FB} \\ c_i^{HK-I-P} + c_i^{TK-Int-I} + c_i^{TK-Ext-I} + c_i^{LK-I} + c_i^{OK-I} & , \text{sonst} \end{cases} \quad (2-4)$$

$$c_i^{HK-I-P} = \frac{\sum_l c_{il}^{HK-L} \cdot d_{il}^{Out}}{\sum_l d_{il}^{Out}} \quad (2-5)$$

Die gesamten Herstellkosten in Produktion und Logistik von Outputfaktoren, die als Endprodukte das Unternehmen verlassen, ergeben sich aus deren Herstellkosten in der Produktion und den dazugehörigen Logistikkosten nach Fertigstellung des Outputfaktors.

$$c_i^{HK-I} = c_i^{HK-I-P} + c_i^{TK-Int-I} + c_i^{TK-Ext-I} + c_i^{LK-I} + c_i^{OK-I} \quad \forall i \in I^{EP} \quad (2-6)$$

Einkaufskosten

Hauptbestandteil der Einkaufskosten sind die für zugekaufte Inputfaktoren zu zahlenden Einkaufspreise. Die Preise hängen häufig von der Menge der bestellten Faktoren ab und sinken bei großen Bestellmengen. Sie sinken jedoch nicht stetig, sondern es gibt sogenannte Rabattstufen, die durch eine Mindestbestellmenge und einen Preis gekennzeichnet sind. Dabei gilt bei Bestellungen immer der niedrigste Preis aller Rabattstufen, deren Mindestbestimmungen überschritten wurden. Neben den Einkaufspreisen fallen bei strategisch wichtigen Lieferanten Kosten im Bereich des Lieferantenmanagements und der Lieferantenpflege an⁹. Des Weiteren übernehmen einige Unternehmen die Kosten für die vom Zulieferer genutzten Maschinen und Werkzeuge (Betreibermodell) [KR06]. Die Einkaufskosten für einen Inputfaktor ergeben sich aus den durchschnittlichen Einkaufskosten bei allen Zulieferern, bei denen der Inputfaktor gekauft wird. Die Kosten bei einem Zulieferer berechnen sich aus der Menge der zugekauften Inputfaktoren im Betrachtungszeitraum multipliziert mit dem Preis bei dem entsprechenden Zulieferer

⁷ Definition siehe unten

⁸ s. Abschnitt 2.1.1.2

⁹ Diese Kosten beinhalten Einmalkosten, z.B. für den Aufbau und die Gestaltung von strategischen, aber flexiblen Lieferantenbeziehungen, und Fixkosten, z.B. für Lieferantenentwicklungsmaßnahmen und für Lieferantenerziehung.

plus den mengenunabhängigen Kosten multipliziert mit dem Zuschlagsfaktor für den betrachteten Inputfaktor.

$$c_i^{ZK-I} = \frac{1}{d_i^{KM}} \cdot \sum_z (c_{iz}^{Preis} \cdot d_{iz}^{BM} + c_z^Z \cdot u_{iz}^{ZS-Z}) \quad (2-7)$$

Transportkosten

In externen Unternehmensnetzwerken stehen unterschiedliche Transportmittel zur Auswahl, die sich in Transportzeit, Transportkapazität und Kosten unterscheiden. Es besteht die Möglichkeit, die Input- oder Outputfaktoren von externen Spediteuren bzw. Zulieferern transportieren zu lassen oder den Transport selber zu übernehmen. Bei einem Eigentransport müssen Transportmittel angeschafft werden. Die Transportkosten gliedern sich in mengenunabhängige¹⁰ und variable¹¹ Kosten. Die Höhe der Transportkosten ist neben der Auswahl des Spediteurs und des Transportmittels auch von der Anlieferfrequenz abhängig¹². Außerdem fallen Kapitalbindungskosten während des Transports an¹³.

Die Transportkosten eines Input- oder Outputfaktors im externen Unternehmensnetzwerk berechnen sich aus den durchschnittlichen Transportkosten von allen Speditionen, die diesen Faktor transportieren. Die Transportkosten eines Faktors bei einem Spediteur setzen sich aus der Anzahl an Transporten des Spediteurs auf den Kanten im Netzwerk multipliziert mit den dazugehörigen variablen Transportkosten (anteilig für den betrachteten Faktor) und den mengenunabhängigen Kosten für die Spedition multipliziert mit dem Zuschlagsfaktor für den betrachteten Faktor zusammen. Die Kapitalbindungskosten je Kante berechnen sich aus dem Wert des transportierten Faktors¹⁴ multipliziert mit der Transportzeit und der durchschnittlichen Transportmenge des Faktors auf der Kante, sowie dem kalkulatorischen Zinssatz.

$$c_i^{TK-Ext-I} = \frac{1}{d_i^I} \cdot \sum_{\tau} \left(\sum_{v\hat{v}} d_{\tau v\hat{v}}^{TA-T} \cdot c_{\tau v\hat{v}}^{Var-T} \cdot u_{i\tau v\hat{v}}^{ZS-T-Var} + u_{i\tau}^{ZS-T} \cdot c_{\tau}^{TK-T} \right. \\ \left. + \sum_{v\hat{v}} d_{\tau v\hat{v}}^{TA-T} \cdot t_{\tau v\hat{v}}^{TD-V} \cdot d_{i\tau v\hat{v}}^{TM-V} \cdot c_i^{Wert-I} \cdot i \right) \quad (2-8)$$

¹⁰ z.B. für Anschaffung und Unterhalt von Transportmitteln und die Bezahlung des Personals

¹¹ z.B. für Kraftstoff oder den Transport mit einer externen Spedition

¹² Bei steigenden Transportfrequenzen sinken die Transportmengen, was meist zu erhöhten Transportkosten führt [EHH08].

¹³ insbesondere bei langen Transportzeiten

¹⁴ Der Wert des transportierten Faktors bestimmt sich aus den Zulieferer- oder den Herstellkosten des Bauteils, je nachdem, ob der Faktor selbst erstellt oder zugekauft wurde.

Beim Transport in internen Standortnetzwerken kann zwischen stetigen¹⁵ und unstetigen¹⁶ Transportsystemen gewählt werden¹⁷. Stetige Transportsysteme sind automatische Fördersysteme und befördern Faktoren zwischen mehreren Kanten im Netzwerk mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit. Unstetige Transportsysteme bestehen aus einem oder mehreren Transportmitteln, die meist von Arbeitskräften bedient werden. Diese Transportmittel können sich frei auf den Kanten des Netzwerks bewegen¹⁸. Die Kapazität von unstetigen Transportsystemen kann durch den Kauf oder Verkauf von neuen Transportmitteln leichter an den Transportbedarf angepasst werden. Die Transportkosten im internen Standortnetzwerk für einen Faktor an einem Produktionsstandort berechnen sich analog zu den Transportkosten im externen Netzwerk, nur dass hier Kapitalbindungskosten aufgrund der relativ kurzen Transportzeiten vernachlässigt werden können.

$$c_i^{TK-Int-l} = \frac{1}{d_i^l} \cdot \sum_{\tau} \left(\sum_{v\hat{v}} c_{\tau v\hat{v}}^{Var-T} \cdot d_{\tau v\hat{v}}^{TA-T} \cdot u_{i\tau v\hat{v}}^{ZS-T-Var} + u_{i\tau}^{ZS-T} \cdot c_{\tau}^{TK-T} \right) \quad (2-9)$$

Lagerkosten

Lager ermöglichen größere Bestellmengen bei den Zulieferern und geringere Transportfrequenzen. Des Weiteren können sie als Zwischenlager zwischen den Knoten des externen Netzwerks zur Bündelung von Transporten¹⁹ genutzt werden. Außerdem haben Lager eine Sicherungsfunktion²⁰, eine Bereitstellungsfunktion²¹ und eine Ausgleichsfunktion²² [KGJ09]. Der Betrieb von Lagern kann hierbei entweder vom Unternehmen selber oder von externen Dienstleistern übernommen werden.

Die Kosten für die Lagerung von Faktoren setzen sich aus den Kosten für das Lager und den Kapitalbindungskosten zusammen. Die Kosten für Lager bestehen aus den Einmalkosten für die Errichtung des Lagers inkl. aller darin befindlichen Lager- und Transportsysteme, den Kosten für den Betrieb des Lagers und den variablen Lagerkosten. Die Kosten für Lagersysteme bestehen wiederum aus den Anschaffungskosten, den Be-

¹⁵ z.B. Elektrohängebahnen und Fließbänder

¹⁶ z.B. Gabelstapler

¹⁷ Stetige Transportmittel haben den Vorteil, dass sie geringere Betriebskosten als unstetige Transportsysteme verursachen, da in der Regel kein Personal für die Durchführung des Transports benötigt wird. Dafür sind die Investitionen in stetige Transportsysteme oft deutlich höher als bei unstetigen Transportsystemen.

¹⁸ Der genaue Zeitpunkt des Transports und die genaue Transportstrecke können, im Gegensatz zu stetigen Transportsystemen, je nach Bedarf festgelegt werden.

¹⁹ Bei der Nutzung von Konsolidierungslagern werden Faktoren von mehreren beieinander liegenden Knoten an das Lager geliefert, von dem aus sie gebündelt an andere Knoten des Netzwerks geliefert werden. Dies führt zu einer besseren Transportauslastung und damit zu reduzierten Transportkosten.

²⁰ Die Sicherungsfunktion von Lagern dient hauptsächlich der Absicherung von Lieferantenausfällen und Transportproblemen und gewährleistet in diesen Fällen die Aufrechterhaltung der Produktion.

²¹ Bestimmte Lager in Produktionsnähe dienen oft der Bereitstellung von Inputfaktoren.

²² Die Ausgleichsfunktion von Lagern wird insbesondere bei einer Produktion mit stark schwankender Nachfrage genutzt, um eine gleichmäßigere Produktion zu gewährleisten.

triebskosten und den variablen Kosten. Die Lagerkosten für einen bestimmten Input- oder Outputfaktor in einem Lager bzw. Lagersystem ergeben sich aus den mengenunabhängigen Kosten für den Bau und Betrieb des Lagers multipliziert mit dem Zuschlagsfaktor für den betrachteten Faktor, der Lagermenge multipliziert mit dem variablen Lagerkostensatz und den Kapitalbindungskosten. Die Kapitalbindungskosten können aus der durchschnittlichen Lagerzeit, der Lagermenge und dem Wert des Faktors ermittelt werden. Die Summe der Lagerkosten eines Faktors in allen Lagern, in denen der Faktor gelagert wird, dividiert durch den Bedarf bzw. die Nachfrage ergeben die durchschnittlichen Lagerkosten des Faktors.

$$c_i^{LK-I} = \frac{1}{d_i^I} \cdot \sum_j (c_j^{LK-J} \cdot u_{ij}^{ZS-J} + c_{ij}^{Var-J} \cdot d_{ij}^{LM-J} + d_{ij}^{LM-J} \cdot t_{ij}^{LD-J} \cdot c_i^{Wert-I} \cdot i) \quad (2-10)$$

Kosten für zusätzliche fremdzuvergebende Operationen

Neben der Herstellung sowie dem Transport und der Lagerung von Faktoren können noch weitere Operationen an Zulieferer oder externe Dienstleister vergeben werden. Diese sind beispielsweise die Sicherstellung der notwendigen Qualität und das Kommissionieren. Die zusätzlichen Operationen werden in zwei Kategorien unterteilt: die exklusiven und die nicht exklusiven Operationen. Die exklusiven Operationen müssen im Gegensatz zu den nicht exklusiven alle in einem Lager- oder Transportsystem durchgeführt werden²³. Bei einer Fremdvergabe der Operationen entstehen variable Kosten, während bei einer Durchführung im eigenen Unternehmen auch Einmalkosten für die Anschaffung der für die Operationen notwendigen Anlagen und Fixkosten für Wartung und Personal hinzukommen. Die Kosten für zusätzliche Operationen eines Faktors an einem Standort können über die mengenunabhängigen Kosten der betrachteten Operation multipliziert mit dem Zuschlagsfaktor für den betrachteten Faktor und der Menge an Operationsdurchführungen multipliziert mit dem variablen Operationskostensatz des Standorts ermittelt werden. Die durchschnittlichen Kosten für alle zusätzlichen Operationen berechnen sich aus der Summe der Operationskosten eines Standorts über alle Operationen und Standorte dividiert durch den Bedarf des Faktors im Betrachtungszeitraum (2-11).

$$c_i^{OK-I} = \frac{1}{d_i^I} \cdot \sum_{o,v} (c_{ov}^{OK-V} \cdot u_{ivo}^{ZS-V-O} + c_{ivo}^{Var-O} \cdot d_{ivo}^{OD-V}) \quad (2-11)$$

²³ Zum Beispiel stellt das Kommissionieren von Inputfaktoren eine exklusive Operation dar, da der Steuerungsaufwand an unterschiedlichen Orten im Netzwerk zu hoch wäre. Die Qualitätssicherung kann hingegen durch eine nicht exklusive Operation repräsentiert werden.

2.1.2 Variantenabhängige Kosten in Produktion und Logistik

Hersteller variantenreicher Serienprodukte bieten eine kleine Menge an unterschiedlichen Produkten an, die mit Hilfe von Differenzierungsmerkmalen²⁴ an die Wünsche der Kunden angepasst werden können²⁵. Variantenabhängige Kosten sind bei der variantenreichen Serienproduktion Bestandteil der Herstellkosten. Sie fallen für den nicht wertschöpfenden Zusatzaufwand an, der entsteht, wenn sich Komponenten aus mehreren Varianten zusammensetzen. Eine Komponente wird im Folgenden als Menge von Inputfaktoren definiert, die an der gleichen Position eines oder mehrerer Endprodukte verbaut werden und komplementär zueinander sind. Ein Inputfaktor dieser Menge repräsentiert eine Variante der Komponente. Die variantenabhängigen Kosten in der Produktion werden in Sortenwechselkosten und Sortenwechselfolgekosten unterteilt. Die Sortenwechselkosten bestehen aus den Rüstkosten, den Losanlaufkosten und den Modell-Mix-Kosten. Die Sortenwechselfolgekosten setzen sich aus den Instandhaltungskosten für Sonderbetriebsmittel und den Kosten durch Nacharbeit und Ausschuss zusammen [Köh88]. Die variantenabhängigen Kosten in der Logistik bestehen aus zusätzlichen Bestands- und Transportkosten, sowie erhöhten Kosten beim Einkauf von Bauteilen und erhöhten Kosten für Operationen. Eine genaue Beschreibung der variantenabhängigen Kosten in der Produktion erfolgt in Kapitel 2.1.2.1, während die variantenabhängigen Kosten in der Logistik in Kapitel 2.1.2.2 beschrieben werden.

Die unterschiedlichen Kostenarten der variantenabhängigen Kosten sind Teil der Gemeinkosten und können über die in Kapitel 2.1.1.1 beschriebene Zuschlagskalkulation den Herstellkosten der Outputfaktoren zugerechnet werden. Diese Zuordnung dient dabei lediglich der vollständigen Abschätzung der Herstellkosten zur Preisermittlung für die produzierten Endprodukte. Es können daraus jedoch keine Rückschlüsse gezogen werden, wie hoch die Einsparungen durch die Reduzierung einer Komponente um eine Variante sind. Deshalb werden die Kostenarten im Folgenden jeweils als Gesamtkosten für das Unternehmen in einem bestimmten Betrachtungszeitraum definiert.

²⁴ Ein Differenzierungsmerkmal ist ein bestimmtes Merkmal einer Endproduktvariante, das sich von anderen Varianten des Endprodukts unterscheiden kann (z.B. Farbe eines Automobils mit Ausprägung „blau“). Da die Kombinationsmöglichkeiten aller Ausprägungen der Differenzierungsmerkmale zu einer sehr großen Anzahl an Endproduktvarianten führen können, erfolgt die Produktion der Produkte meist kundenauftragsbezogen.

²⁵ z.B. die Automobil-, die Flugzeug oder die Haushaltsgeräteindustrie

2.1.2.1 Variantenabhängige Kosten in der Produktion

Rüstkosten

In vielen Bereichen der variantenreichen Serienproduktion wird in Losen produziert²⁶. Ein Los besteht dabei aus einer Menge identischer Produkte, die hintereinander in einem Arbeitssystem gefertigt werden. Bei einem Wechsel der Lose müssen die Produktionsanlagen des Arbeitssystems umgerüstet werden. Die dabei anfallenden Rüstkosten sind unabhängig von der Größe der Lose und können je nach Rüstvorgang variieren²⁷. Sie setzen sich aus den Rüst-Belegungskosten und den Rüst-Auftragskosten zusammen (2-14). Die Rüst-Belegungskosten berechnen sich aus der Anzahl an Rüstvorgängen im Betrachtungszeitraum, der Rüstzeit (anteilig von der Maschinenbetriebszeit im Betrachtungszeitraum) und den Kosten für die im Arbeitssystem befindlichen Maschinen (2-12). Die Rüstzeit ist dabei die Zeitspanne, die benötigt wird, bis das zu rüstende Arbeitssystem das erste fehlerfreie Teil des neuen Loses produziert²⁸. Die Rüst-Auftragskosten berechnen sich aus der Anzahl der Rüstvorgänge, der Arbeitszeit des Umrüstpersonals während des Umrüstvorgangs (anteilig von der Arbeitszeit eines Arbeiters im Betrachtungszeitraum) und dem jeweiligen Fertigungslohn (2-13). Die Arbeitszeiten des Umrüstpersonals sind dabei nicht immer mit der Rüst-Belegungszeit identisch und hängen auch vom jeweiligen Rüstvorgang ab [Köh88]. Wartezeiten der regulären Arbeiter werden zu den Rüst-Auftragskosten zugerechnet.

$$c_l^{RBK-L} = \sum_{\rho, i \in I_l^{Out}, i \in I_l^{Out}} d_{iil}^{Rüst} \cdot \frac{t_{iil}^{Rüst}}{t_{\rho}^{P-BZ}} \cdot c_{\rho}^P \cdot d_{l\rho}^{L-P} \quad (2-12)$$

$$c_l^{RAK-L} = \sum_{q, i \in I_l^{Out}, i \in I_l^{Out}} d_{iil}^{Rüst} \cdot \frac{t_{iil}^{Rüst-Q}}{t_q^{Q-BZ}} \cdot c_q^{Lohn} \quad (2-13)$$

$$c_l^{RK-L} = c_l^{RBK-L} + c_l^{RAK-L} \quad (2-14)$$

Losanlaufkosten

Die Ausbringung der Arbeitssysteme direkt nach dem Rüsten ist oft niedriger als die geplante Produktionsleistung und nähert sich dieser nach einiger Zeit an (*Abbildung 2-1*). Diese Minderleistung führt zu Ausfallzeiten von Maschinen und Personal²⁹ und

²⁶ z.B. im Presswerk und in der Fertigungsbearbeitung in der Automobilindustrie

²⁷ So verursacht beispielsweise der Rüstvorgang von Produkt A nach Produkt B andere Rüstkosten als der Rüstvorgang von Produkt B nach Produkt C.

²⁸ Die Rüstzeit setzt sich aus der Zeit für Werkzeugwechsel, Justierung und Maschinen anfahren zusammen.

²⁹ Die in der Anlaufzeit produzierten Produkte könnten bei normaler Kapazität der Fertigungsanlagen in kürzerer Zeit hergestellt werden. Die Differenz zwischen der Anlaufzeit und der Fertigungszeit für die gleiche Menge an Produkten bei normaler Kapazität kann als Ausfallzeit durch die Minderleistung bei Losanlauf gesehen werden.

wird aus der Differenz zwischen der vollen und der reduzierten Ausbringungsmenge des Outputs dividiert durch die Produktionsleistung des Arbeitssystems berechnet (2-15). Die Kosten für diese Ausfallzeiten werden Losanlaufkosten genannt. Wie bei den Rüstkosten können die Losanlaufkosten in Losanlauf-Belegungskosten und Losanlauf-Auftragskosten unterteilt werden. Die Belegungskosten berechnen sich aus der Anzahl der Rüstvorgänge, der durch die Minderleistung verlorenen Maschinenzeit (anteilig von der Maschinenbetriebszeit im Betrachtungszeitraum) und den dazugehörigen Maschinenkosten im Betrachtungszeitraum (2-16). Die Auftragskosten können über die Anzahl der Rüstvorgänge, die verlorene Arbeitszeit des Personals im Arbeitssystem (anteilig von der Arbeitszeit eines Arbeiters im Betrachtungszeitraum) und dem jeweiligen Fertigungslohn ermittelt werden (2-17) [Köh88].

$$t_{iil}^{LA} = \frac{d_{il}^{Voll} - d_{iil}^{LA}}{p_{il}^{I-L}} \quad (2-15)$$

$$c_l^{LA-BK-L} = \sum_{\rho, i \in I_l^{Out}, \hat{i} \in I_l^{Out}} d_{iil}^{Rüst} \cdot \frac{t_{iil}^{LA}}{t_{\rho}^{P-BZ}} \cdot c_{\rho}^P \cdot d_{\rho l}^{P-L} \quad (2-16)$$

$$c_l^{LA-AK-L} = \sum_{q, i \in I_l^{Out}, \hat{i} \in I_l^{Out}} d_{iil}^{Rüst} \cdot \frac{t_{iil}^{LA}}{t_q^{Q-BZ}} \cdot c_q^{Lohn} \cdot d_{ql}^{Q-L} \quad (2-17)$$

$$c_l^{LAK-L} = c_l^{LA-BK-L} + c_l^{LA-AK-L} \quad (2-18)$$

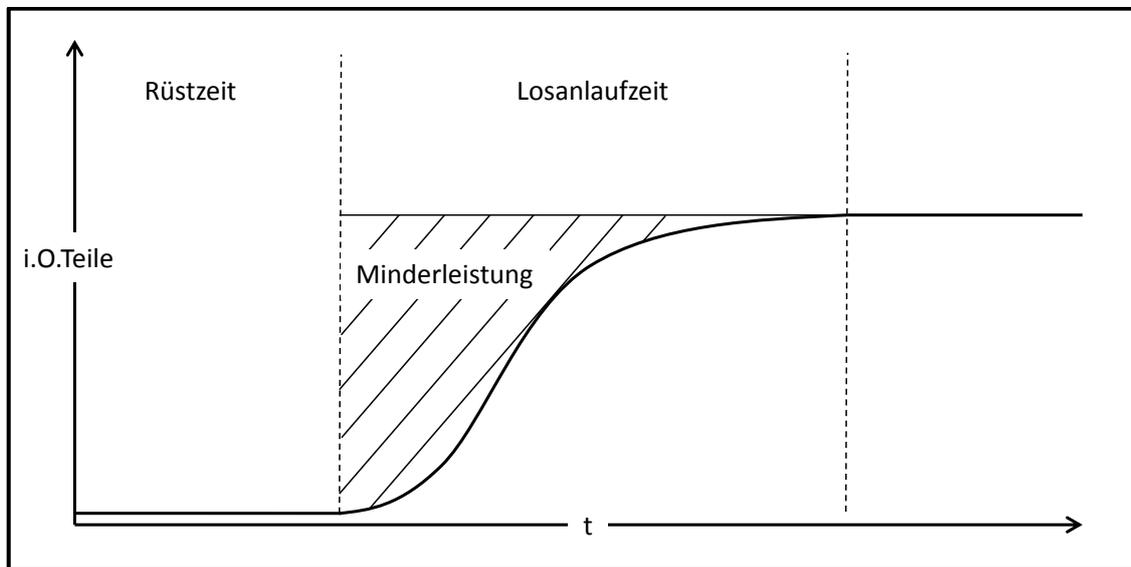


Abbildung 2-1: Losanlaufkosten aufgrund von Minderleistung nach dem Rüsten nach Köhler [Köh88]

Modell-Mix-Kosten

Durch den Einsatz hochflexibler Maschinen und durch manuelle Arbeiten kann in einigen Arbeitssystemen der variantenreichen Serienproduktion mit einer Losgröße von 1

gefertigt werden³⁰. In diesen Abschnitten können aufgrund der Flexibilität die Rüst- und Losanlaufkosten vernachlässigt werden. Dafür fallen Kosten für Taktausgleichsverluste und Personalkosten für den Einsatz von Springern an. Diese Kosten werden unter dem Begriff Modell-Mix-Kosten zusammengefasst [Köh88].

Vorrangige Organisationsform in diesen Arbeitssystemen ist die Fließlinienfertigung. Eine Fließlinie besteht aus einer Menge von Stationen, die mit einem automatischen Fördersystem³¹ miteinander verbunden sind. An jeder Station können sich ein oder mehrere Arbeitsplätze befinden. Jedes Produkt durchläuft nacheinander die unterschiedlichen Stationen. Dabei wird an allen Arbeitsplätzen eine bestimmte Menge an Arbeiten an dem Produkt durchgeführt. Die Arbeiten an den Arbeitsplätzen sind dabei in möglichst kleine, nicht trennbare Arbeitsvorgänge (AVOs) unterteilt. Jeder AVO ist eindeutig und genau einem Arbeitsplatz zugeordnet. Für ein Produkt muss nur eine Teilmenge aller AVOs durchgeführt werden, weshalb sich die Arbeitszeiten an den Arbeitsplätzen je nach Produkt unterscheiden. Den Werkern oder Maschinen steht an jedem Arbeitsplatz je Produkt die Taktzeit zur Verfügung um die AVOs abzuarbeiten. Die Taktzeit ergibt sich aus der geplanten Ausbringungsmenge und der zur Verfügung stehenden Produktionszeit in einem bestimmten Zeitraum. Bei manuellen Tätigkeiten ist es möglich, die Kapazität eines Arbeitsplatzes auf ein Vielfaches der Taktzeit zu erhöhen. In einem solchen Fall arbeitet ein Werker die x-fache Taktzeit an einem Produkt, übernimmt aber nur jedes x-te Produkt. Dementsprechend arbeitet an solchen Arbeitsplätzen die x-fache Anzahl an Werkern.

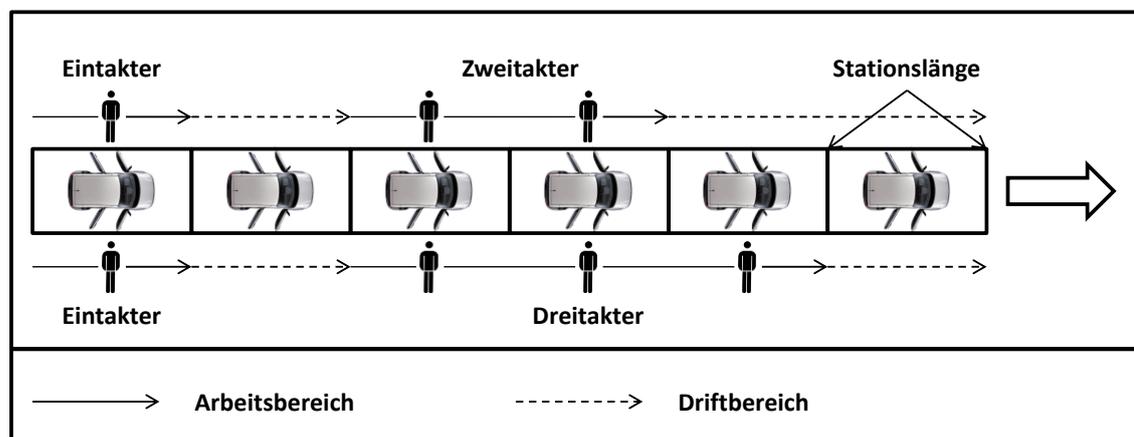


Abbildung 2-2: Beispiel eines Abschnitts einer Fließlinie

Bei der Fließlinienfertigung gibt es zwei unterschiedliche Arten von Stationsgrenzen: geschlossene und offene Stationsgrenzen. Bei geschlossenen Stationsgrenzen müssen alle Arbeiten eines Arbeitsplatzes innerhalb der Taktzeit bzw. des Vielfachen der Takt-

³⁰ z.B. in der Montage

³¹ z.B. einem Transportband oder einer Elektrohängebahn

zeit abgeschlossen werden. Da die Arbeitszeit auf den Arbeitsplätzen oft niedriger als die zur Verfügung stehende Arbeitszeit ist, sind die Arbeiter bzw. die Anlagen nicht voll ausgelastet. Die Differenz zwischen der gesamten Arbeitszeit an einem Arbeitsplatz und der Bearbeitungszeit an allen Produkten wird Taktausgleichsverlust genannt (2-19) [Gan09]. Die durch die Taktausgleichsverluste verursachten Kosten können wiederum in Belegungskosten und Auftragskosten unterteilt werden. Dabei werden die Auftragskosten mit Hilfe der Taktausgleichsverluste dividiert durch die Arbeitszeit eines Bandarbeiters (BA) und multipliziert mit den entsprechenden Lohnkosten berechnet. Die Belegungskosten werden durch die Taktausgleichsverluste dividiert durch die im Betrachtungszeitraum zur Verfügung stehende Maschinenzeit und multipliziert mit Anzahl und Kosten der Maschinen ermittelt (2-20).

$$t_{wl}^{TA} = d_{wl}^{Takter-W} \cdot t_l^{Takt} \cdot d^{Takte} - \sum_i t_{iwl}^{Bearb-l} \quad (2-19)$$

$$c_l^{TAK} = \sum_w t_{wl}^{TA} \cdot \left(\frac{c_{q=BA}^{Lohn}}{t_{q=BA}^{Q-BZ}} + \sum_{\rho \in P_{wl}^W} \frac{d_{wpl}^{W-P} \cdot c_\rho^P}{t_\rho^{P-BZ}} \right) \quad (2-20)$$

Bei der Fließlinienfertigung mit offenen Stationsgrenzen ist es möglich, die Bearbeitung an einem Werkstück auch über die Arbeitsplatzgrenze hinaus fortzusetzen³². Bei der Bearbeitung eines Werkstücks über die Arbeitsplatzgrenze hinaus, im Folgenden Driften genannt, kann der Arbeiter die Bearbeitung des nachfolgenden Produkts entsprechend später beginnen³³. Bei der Zuteilung der AVos zu den einzelnen Arbeitsplätzen, der sogenannten Austaktung, wird darauf geachtet, dass die durchschnittliche Bearbeitungszeit jedes Arbeitsplatzes niedriger ist als die zur Verfügung stehende Arbeitszeit³⁴. Trotzdem kann es durch eine ungünstige Montagereihenfolge vorkommen, dass an manchen Arbeitsplätzen mehrere Produkte mit Bearbeitungszeiten über der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit hintereinander bearbeitet werden müssen. Dadurch verschiebt sich die Position des Arbeiters immer weiter von seiner ursprünglichen Station. Ab einer bestimmten Stelle an der Fließlinie ist ein Driften nicht weiter möglich³⁵. Droht ein Arbeiter hinter diese Grenze zu driften, muss entweder die Fließlinie angehalten oder ein unterstützender Arbeiter, ein sogenannter Springer, muss eingesetzt werden (Abbildung 2-3). Der Springer arbeitet dabei entweder mit dem regulären Arbeiter mit oder übernimmt die komplette Bearbeitung des kritischen Produkts [Alt09].

³² Diese Form der Fließlinienfertigung wird in überwiegend manuellen Bereichen eingesetzt, da die Mobilität von größeren technischen Anlagen mit hohen Kosten verbunden ist und diese daher oft auf eine Station beschränkt sind.

³³ Ist die Bearbeitungszeit dieses nachfolgenden Produkts dann deutlich unterhalb der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit, so kann der zeitliche Verzug durch das Driften wieder kompensiert werden.

³⁴ Die zur Verfügung stehende Arbeitszeit entspricht dabei immer einem Vielfachen der Taktzeit.

³⁵ z.B. aufgrund der nächsten Arbeitsstation oder dem Fließlinienende

Die Modell-Mix-Kosten bei Fließlinien mit offenen Stationsgrenzen setzen sich aus den Kosten für Taktausgleichsverluste und den Kosten für die Springer zusammen³⁶. Die Taktausgleichsverluste werden wie bei Fließlinien mit geschlossenen Stationsgrenzen berechnet. Der Taktausgleichsverlust erhöht sich jedoch um die Summe der Bearbeitungszeiten aller Produkte am jeweiligen Arbeitsplatz, die ein Springer übernimmt, da der Springer die Arbeitszeit des regulären Arbeiters weiter reduziert (2-21). Die Taktausgleichsverluste durch Springer wirken sich nur auf die Personalkosten aus (2-22).

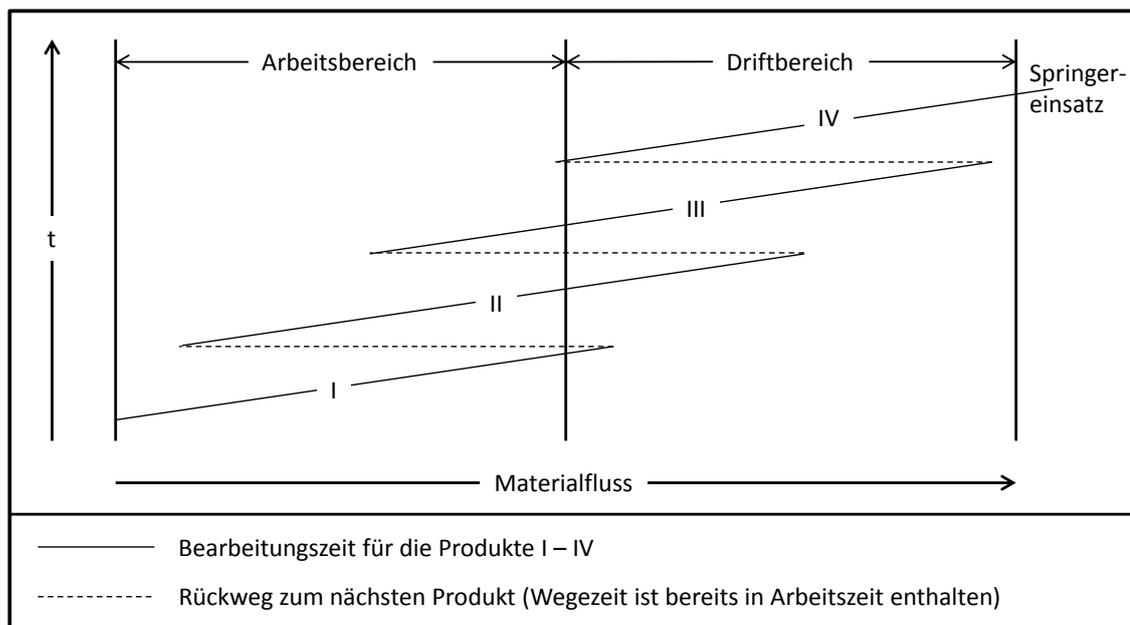


Abbildung 2-3: Ungünstiger Driftverlauf eines Arbeiters mit notwendigem Springereinsatz bei Fahrzeug IV (Darstellung nach Altemeier et al. [AHD10])

Zusätzlich fallen Kosten für Springer an. So ist der Fertigungslohn eines Springers aufgrund seiner Flexibilität höher als der eines regulären Arbeiters. Da die Arbeitszeit eines Springers (SP) während seines Einsatzes genau einem Produkt zugeordnet werden kann, fallen nur die Lohnmehrkosten als Modell-Mix-Kosten an. Die Anzahl der notwendigen Springer in einem Arbeitssystem kann durch die maximale Anzahl gleichzeitiger Springereinsätze ermittelt werden. Wird davon ausgegangen, dass Springer in der Zeit, in der sie keine Einsätze haben, zeitunkritische Vormontagearbeiten übernehmen können, so erhöhen sich die Modell-Mix-Kosten je eingesetztem Springer um die Lohnmehrkosten des Springers gegenüber Lohnkosten eines regulären Arbeiters für dessen gesamte Arbeitszeit. Diese Kosten können daher über die Anzahl der Springer im Arbeitssystem und die Differenz der Fertigungslöhne berechnet werden (2-23).

³⁶ Da ein Bandstopp mit dem Einsatz von Springern vermieden werden kann, wird er nicht weiter betrachtet.

$$t_{wl}^{TA-SP} = \sum_i z_{iwl}^{SE-W} \cdot t_{iwl}^{Bearb-l} \quad (2-21)$$

$$c_l^{TAK} = \sum_w \left((t_{wl}^{TA} + t_{wl}^{TA-SP}) \cdot \frac{c_{q=BA}^{Lohn}}{t_{q=BA}^{Q-BZ}} + t_{wl}^{TA} \cdot \sum_{\rho \in P_{wl}^W} \frac{d_{w\rho l}^{W-P} \cdot c_{\rho}^P}{t_{\rho}^{P-BZ}} \right) \quad (2-22)$$

$$c_l^{SPK} = d_l^{SP-L} \cdot (c_{q=SP}^{Q-T} - c_{q=BA}^{Q-T}) \quad (2-23)$$

Instandhaltungskosten für Sonderbetriebsmittel

Varianten einer Komponente können eigene Betriebsmittel benötigen³⁷. Da der Instandhaltungsaufwand für Betriebsmittel nicht immer proportional zur damit hergestellten Produktionsmenge ist, sondern auch bei einer „Null-Nutzung“ eine zeitabhängige Überprüfung stattfinden kann, können zusätzliche Instandhaltungskosten anfallen, die den variantenabhängigen Kosten zuzuordnen sind [Köh88]. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Instandhaltung entweder nach einer bestimmten Serviceintervallzeit oder nach einer bestimmten Menge an produzierten Produkten erfolgt (2-24). Erhöht sich das Instandhaltungsintervall eines Betriebsmittels, so reduziert sich die Anzahl an Instandhaltungen im Betrachtungszeitraum und damit die Instandhaltungskosten für das Betriebsmittel. Die Anzahl an notwendigen Instandhaltungen im Betrachtungszeitraum ergeben sich durch die Division der Zeit zwischen zwei Instandhaltungen³⁸ und der zur Verfügung stehenden Zeit im Betrachtungszeitraum (2-25). Die Instandhaltungskosten eines Betriebsmittels können durch die Anzahl der Instandhaltungen, die Arbeitszeit der notwendigen Arbeiter für eine Instandhaltung (anteilig an der Arbeitszeit des entsprechenden Arbeiters im Betrachtungszeitraum) und die entsprechenden Lohnkosten berechnet werden (2-26). Da durch zusätzliche Betriebsmittel Instandhaltungskosten für mehr Betriebsmittel anfallen, steigen die Gesamtinstandhaltungskosten mit zunehmender Variantenvielfalt trotz der sinkenden Instandhaltungskosten für die einzelnen Betriebsmittel. Die variantenabhängigen Instandhaltungskosten ergeben sich aus der Summe der Instandhaltungskosten aller Betriebsmittel subtrahiert mit den durchschnittlichen Instandhaltungskosten unter der Annahme, dass je Komponente ausschließlich das jeweilige Betriebsmittel eingesetzt wird (2-27).

$$t_{\rho l}^{II-L} = \min(t_{\rho l}^{SI}, \{t | d_{\rho l t}^{P-T} \geq d_{\rho l}^{SI}\}) \quad (2-24)$$

$$d_{\rho l}^{IH} = \frac{t_{\rho l}^{II-L}}{t_{\rho}^{P-BZ}} \quad (2-25)$$

$$c_{\rho l}^{IHK-P} = d_{\rho l}^{IH} \cdot \sum_q \frac{t_{\rho q}^{IHK-Q}}{t_q^{Q-BZ}} \cdot c_q^{Lohn} \quad (2-26)$$

³⁷ z.B. eigene Werkzeuge

³⁸ unter der Annahme, dass die Intervalle zwischen den Instandhaltungen identisch sind

$$c_l^{IHK-L} = \sum_{\rho} c_{\rho l}^{IHK-P} - \frac{1}{|P|} \cdot \sum_{\rho} c_{\rho l}^{IHK-P-VL} \quad (2-27)$$

Kosten für Nacharbeit und Ausschuss

Nach einem Umrüstvorgang kann es vermehrt zur Produktion fehlerhafter Outputfaktoren kommen. Diese Outputfaktoren müssen dann, falls möglich, nachgearbeitet oder sonst entsorgt werden [Köh88]. Die Kosten für die Nacharbeit ergeben sich aus den Nacharbeits-Auftragskosten und den Nacharbeits-Belegungskosten. Die Nacharbeits-Auftragskosten können durch die Anzahl der Rüstvorgänge multipliziert mit der jeweiligen Anzahl Ausschuss je Rüstvorgang, der Arbeitszeit für die Nacharbeit eines Outputfaktors (anteilig an der Arbeitszeit des entsprechenden Arbeiters im Betrachtungszeitraum) und den jeweiligen Fertigungslöhnen berechnet werden (2-28). Die Nacharbeits-Belegungskosten ergeben sich aus der Anzahl der Rüstvorgänge multipliziert mit der jeweiligen Anzahl Ausschuss je Rüstvorgang, der Maschinenzeit für die notwendigen Betriebsmittel zur Nacharbeit (anteilig an der zur Verfügung stehenden Maschinenzeit im Betrachtungszeitraum) und den jeweiligen Betriebsmittelkosten (2-29). Die Kosten für den Ausschuss können aus der Anzahl der Rüstvorgänge, der Menge der fehlerhaften Produkte je Rüstvorgang und den Herstellkosten im betrachteten Arbeitssystem berechnet werden (2-30).

$$c_l^{NAK-AK} = \sum_{q, i \in I_l^{Out}, i \in I_l^{Out}} d_{iil}^{Rüst} \cdot d_{iil}^{NA} \cdot \sum_q \frac{t_{iq}^{NA-Q}}{t_q^{Q-BZ}} \cdot c_q^{Q-T} \quad (2-28)$$

$$c_l^{NAK-BK} = \sum_{\rho, i \in I_l^{Out}, i \in I_l^{Out}} d_{iil}^{Rüst} \cdot d_{iil}^{NA} \cdot \sum_{\rho} \frac{t_{i\rho}^{NA-P}}{t_{\rho}^{P-BZ}} \cdot c_{\rho}^P \quad (2-29)$$

$$c_l^{ASK-L} = \sum_{i \in I_l^{Out}, i \in I_l^{Out}} d_{iil}^{Rüst} \cdot d_{iil}^{AS} \cdot c_{il}^{HK-L} \quad (2-30)$$

$$c_l^{NA-AS-K} = c_l^{NAK-AK} + c_l^{NAK-BK} + c_l^{ASK-L} \quad (2-31)$$

Im Bereich der Fließlinienfertigung können sowohl Stresssituationen als auch erhöhter Taktausgleich³⁹ und der Einsatz von Springern⁴⁰ zu einer erhöhten Fehlerrate und damit zu Nacharbeit oder Ausschuss führen. Die genaue Abhängigkeit zwischen Qualitätsproblemen und den drei beschriebenen Problemgründen kann nur schwer bestimmt werden. Allerdings zeigt Syska, dass eine Korrelation zwischen der Fehlerrate und den Problemgründen besteht [Sys07]. Durch einen Springereinsatz treten alle Problemgrün-

³⁹ Mit erhöhtem Taktausgleich lässt die Konzentration der Mitarbeiter nach und es können sich Qualitätsmängel ergeben.

⁴⁰ Da Springer in der Regel weniger Erfahrung bei der Ausführung der AVos haben, unterlaufen ihnen in der Regel häufiger Fehler als den regulären Arbeitern.

de gleichzeitig auf⁴¹ und es wird daher in Anlehnung an Altemeier ein linearer Zusammenhang zur Abschätzung der Kosten unterstellt [Alt09]. Somit ergeben sich die Kosten für Nacharbeit und Ausschuss in der Fließlinienfertigung aus der Anzahl der Springereinsätze und dem Kostensatz für Nacharbeit und Ausschuss je Springereinsatz (2-32).

$$c_i^{NA-SP-K} = d_i^{SPE-L} \cdot c_i^{SP-NA} \quad (2-32)$$

2.1.2.2 Variantenabhängige Kosten in der Logistik

Variantenabhängige Einkaufskosten

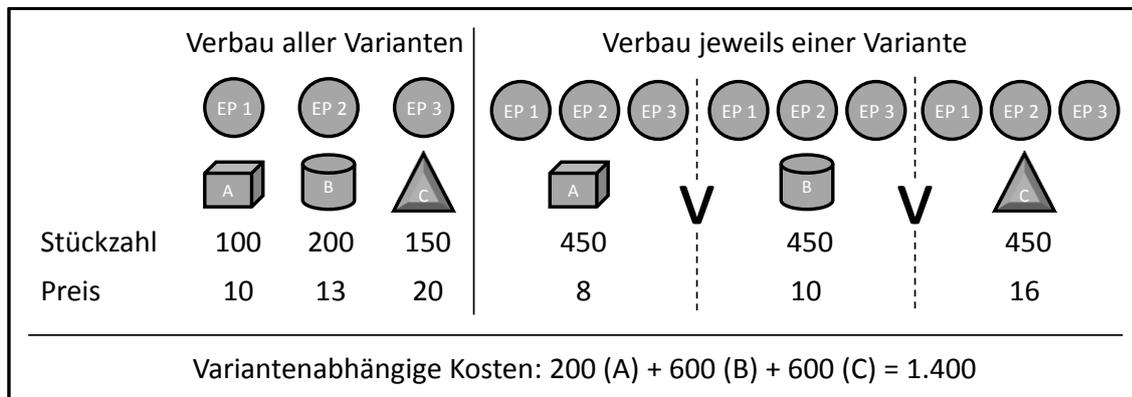


Abbildung 2-4: Exemplarisches Beispiel zur Berechnung der variantenabhängigen Einkaufskosten

Mit einer Zunahme der Variantenanzahl einer zugekauften Komponente steigen die variantenabhängigen Herstellkosten beim Zulieferer, was zu steigenden Einkaufspreisen führt. Die variantenabhängigen Einkaufskosten für eine Variante einer Komponente ergibt sich aus der Differenz zwischen dem aktuellen Einkaufspreis und dem theoretisch möglichen Preis der Variante, bei dem davon ausgegangen wird, dass die betrachtete Variante alle anderen Varianten der Komponente substituiert und dadurch in einer entsprechend höheren Stückzahl beschafft werden kann. Die variantenabhängigen Kosten bei Zulieferern ergeben sich aus der Summe der Preisdifferenzen aller Varianten aller Komponenten bei allen Zulieferern multipliziert mit der jeweils benötigten Stückzahl (2-33).

$$c^{ZK-V} = \sum_{i,z} (c_{iz}^{Preis} - c_i^{Preis-VL}) \cdot d_{iz}^{BM} \quad (2-33)$$

⁴¹ Einem Springereinsatz geht eine Drucksituation für den regulären Arbeiter voraus, der Springer selber begeht verstärkt Fehler und durch den Springereinsatz erhöht sich der Taktgleich des regulären Arbeiters.

Variantenabhängige Transportkosten

Der Bedarf an Inputfaktoren ohne Varianten ist in der Regel gleichmäßig und gut prognostizierbar. Mit zunehmender Variantenvielfalt wird der Bedarf an den einzelnen Varianten eines Inputfaktors immer schwerer vorhersehbar. Aus diesem Grund muss immer flexibler auf Transportanfragen reagiert werden. Dies führt dazu, dass sich die Transportmengen je Transport reduzieren und damit die Auslastung der Transportmittel sinkt. Daraus resultiert eine steigende Anzahl an Transporten und damit auch ein Mehrbedarf an Transportmitteln. Auch die Transportkosten innerhalb von Produktions- und Lagerstandorten erhöhen sich durch die Variantenvielfalt. So sinkt die Auslastung der Transportmittel zwischen den Arbeitssystemen aufgrund von reduzierten Losgrößen in der Losfertigung [Köh88]. Die zusätzlichen Kosten für Transporte können daher über die Differenz zwischen der Anzahl der Transporte multipliziert mit dem jeweiligen Kostensatz und der Differenz der mengenunabhängigen Kosten im Betrachtungszeitraum berechnet werden (2-34).

$$c^{TK-V} = \sum_{\tau} \left(\sum_{v\hat{v}} (d_{\tau v\hat{v}}^{TA-T} - d_{\tau v\hat{v}}^{TA-T-VL}) \cdot c_{\tau v\hat{v}}^{Var-T} + c_{\tau}^{TK-T} - c_{\tau}^{TK-T-VL} \right) \quad (2-34)$$

Variantenabhängige Lagerkosten

Wie oben beschrieben sinkt mit erhöhter Variantenanzahl die Prognostizierbarkeit des Variantenteilebedarfs. Um eine störungsfreie Produktion zu gewährleisten, führt dies oft zu steigenden Sicherheitsbeständen. Neben den erhöhten Sicherheitsbeständen vergrößern sich auch die Bestände in Lagern mit Bereitstellungsfunktion, da in diesen Lagern alle Varianten eines Bauteils zur Entnahme bereitliegen müssen. Um den steigenden Herstellkosten in der Produktion entgegenzuwirken, werden die Lose in der Losfertigung vergrößert, was zu erhöhten Ausgleichsbeständen führt. Neben einer Erhöhung der Lagermenge nimmt auch die durchschnittliche Lagerzeit zu.

Die variantenabhängigen Lagerkosten können über die erhöhten Kosten für Lager bzw. Lagersysteme, die erhöhten variablen Lagerkosten und die erhöhten Kapitalbindungskosten ermittelt werden (2-35). Die erhöhten Kosten für Lager bzw. Lagersysteme ergeben sich aus der Differenz zwischen den notwendigen Kosten für das jeweilige Lager im Betrachtungszeitraum. Die Berechnung der erhöhten variablen Kosten erfolgt durch die Multiplikation zwischen den unterschiedlichen Lagermengen der Bauteile im jeweiligen Lager und dem variablen Lagerkostensatz. Die Differenz aus den durchschnittlichen Lagerzeiten für die unterschiedlichen Bauteile in den Lagern multipliziert mit dem Wert der Bauteile und dem kalkulatorischen Zinssatz führt zu den erhöhten Kapitalbindungskosten für die Lagerung.

$$\begin{aligned}
c^{LK-V} = \sum_j \left((c_j^{LK-J} - c_j^{LK-J-VL}) + \sum_i c_{ij}^{Var-J} \cdot (d_{ij}^{LM-J} - d_{ij}^{LM-J-VL}) \right. \\
\left. + \sum_i (t_{ij}^{LD-J} - t_{ij}^{LD-J-VL}) \cdot c_i^{Wert-I} \cdot i \right) \quad (2-35)
\end{aligned}$$

Variantenabhängige Kosten für zusätzliche fremdzuvergebende Operationen

Durch eine Zunahme der Variantenvielfalt erhöht sich der Aufwand für Operationen⁴². Außerdem kann durch begrenzte Materialflächen in Arbeitssystemen nur eine begrenzte Menge an Inputfaktoren angeliefert werden, was bei zunehmender Variantenvielfalt dazu führt, dass nicht mehr alle benötigten Varianten gleichzeitig angeliefert werden können. Daher müssen Inputfaktoren in einem Logistikbereich oder extern in Produktionsreihenfolge vorsortiert werden. Diese Sortierung (auch Sequenzierung genannt) verursacht Kosten in Form von technischen Hilfsmitteln und Personalkosten⁴³. Die variantenabhängigen Kosten für zusätzliche Operationen ergeben sich aus der Differenz der Kosten für die notwendigen Anlagen und das notwendige Personal für die Durchführung der Operationen mit und ohne Variantenvielfalt und den erhöhten variablen Kosten, die sich aus der erhöhten Anzahl an notwendigen Operationsdurchführungen und dem variablen Kostensatz berechnen lassen (2-36).

$$c^{OK-VK} = \sum_{o,v} \left((c_{ov}^{OK-V} - c_{ov}^{OK-V-VL}) + c_{ivo}^{Var-O} \cdot (d_{ivo}^{OD-V} - d_{ivo}^{OD-V-VL}) \right) \quad (2-36)$$

2.2 Gleichteilestrategien bei variantenreichen Serienprodukten

In der Serienfertigung wird versucht, Bauteile so zu gestalten, dass sie in möglichst vielen Produktvarianten verbaut werden können, ohne die von Kunden wahrnehmbare Produktvielfalt einzuschränken⁴⁴. In dieser Arbeit wird ein Gleichteil als ein Bauteil definiert, das mindestens zwei bestehende Bauteile einer Komponente substituiert. Der Gleichteilegrad einer Komponente wird über den Kehrwert der Anzahl unterschiedlicher Varianten einer Komponente definiert (2-37).

⁴² So erhöht sich beispielsweise der Aufwand für die Kommissionierung, da die Inputfaktoren für einen Auftrag aus einer größeren Menge an unterschiedlichen Varianten zusammengestellt werden müssen. Dadurch wird mehr Lagerplatz benötigt und die Prozesszeiten steigen.

⁴³ Die Kosten für die Sortierung steigen je nach Anzahl der Varianten durch mehr Lagerplatz und längere Prozesszeiten.

⁴⁴ Dadurch können die variantenabhängigen Kosten bei einer gleichbleibenden Absatzmenge gesenkt werden. Allerdings verursachen Gleichteile gleichzeitig erhöhte variantenunabhängige Kosten (z.B. für hochwertigere Bestandteile und aufwändigere Produktionsverfahren).

$$u_i^{GTG} = \frac{1}{d_i^{AnzV}} \quad (2-37)$$

Die Erzeugnisstruktur unterscheidet sich bei einer Gleichteilestrategie⁴⁵ von der ursprünglichen Erzeugnisstruktur dadurch, dass bei mindestens einer Komponente zwei oder mehr Bauteile durch Gleichteile ersetzt werden⁴⁶.

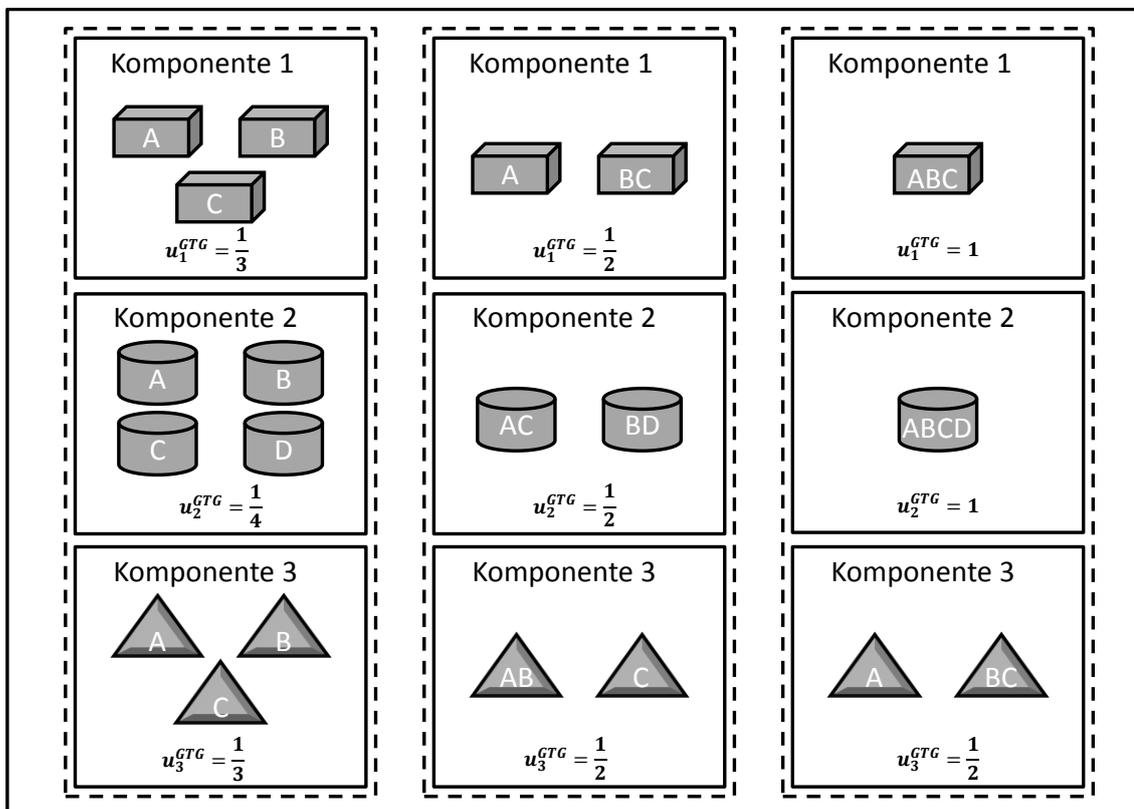


Abbildung 2-5: Beispiel für unterschiedliche Gleichteilestrategien (links ohne Gleichteile, Mitte und rechts mit unterschiedlichen Gleichteilen)

2.3 Anforderungen an ein Planungsmodell zur Bestimmung der Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik bei unterschiedlichen Gleichteilestrategien

Ziel des Planungsmodells ist es, die Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten bei unterschiedlichen Gleichteilestrategien zu bestimmen. Dabei bedarf es einer

⁴⁵ Aufgrund der hohen technischen Anforderungen an die Bauteile und deren Funktionen und an die dazugehörigen Produktionsprozesse sollten Gleichteilestrategien im Dialog mit den Konstrukteuren und Entwicklern entwickelt werden und dienen der in dieser Arbeit entwickelten Methodik daher lediglich als Eingabedaten.

⁴⁶ Bei einer Gleichteilestrategie erhöht sich damit im Vergleich zur ursprünglichen Erzeugnisstruktur der Gleichteilegrad von mindestens einer Komponente.

Neuplanung des Produktions- und Transportnetzwerks⁴⁷. Aufgrund starker Wechselwirkungen bei der Optimierung einzelner Kostenarten⁴⁸ kann die Bestimmung der Herstellkosten nicht für jede Kostenart separat erfolgen, sondern es ist eine simultane Planung des gesamten Produktions- und Transportnetzwerks notwendig.

Aufgrund der hohen Variantenvielfalt bei variantenreichen Serienprodukten⁴⁹ ist die Abbildung aller Varianten der Endprodukte oft nicht möglich, weshalb die Nachfrage nach Endprodukten ohne Betrachtung der Varianten ermittelt werden muss. Daneben sind für alle Ausprägungen eines Differenzierungsmerkmals eines Endprodukts sogenannte Bauraten zu bestimmen, welche den prozentualen Anteil einer Ausprägung an der gesamten produzierten Menge des Endprodukts angeben. Aus den Bauraten und der Erzeugnisstruktur lässt sich anschließend der Bedarf an Inputfaktoren ermitteln.

Die Nachfrage nach den Endprodukten der variantenreichen Serienfertigung verändert sich im Laufe der Zeit, weshalb die Planung über einen längeren Betrachtungszeitraum erfolgen muss. Dieser Zeitraum wird dabei in Planungsperioden unterteilt. Da sich die Menge der zu erstellenden Endprodukte bei unterschiedlichen Gleichteilestrategien nicht verändert, kann im Planungsmodell auf eine Berechnung der Herstellkosten für einzelne Endprodukte verzichtet und lediglich die Summe der Herstellkosten aller erstellten Endprodukte bestimmt werden.

Das Planungsmodell wird in drei Verfahren unterteilt. Das erste Verfahren umfasst die Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks (Kapitel 2.3.1). Die Planung und Bewertung der Arbeitssysteme mit Fließlinienfertigung zusammen mit der Produktions- und Transportnetzwerkplanung führt zu einer starken Zunahme der Planungskomplexität, weshalb die Kosten für diese Arbeitssysteme im ersten Teil des Planungsmodells lediglich abgeschätzt und in einem nachgelagerten Verfahren genau bestimmt werden (Kapitel 2.3.2). Gleiches gilt für die Strukturierung und Dimen-

⁴⁷ Durch den Einsatz von Gleichteilen verändern sich sowohl die Kosten für zugekaufte Komponenten als auch die Herstellkosten für selbsterstellte Komponenten. Diese veränderten Kosten können dazu führen, dass die Entscheidung bezüglich der Eigen- bzw. Fremdfertigung von Komponenten noch einmal überprüft werden muss. Außerdem können durch die reduzierte Variantenvielfalt andere technische Systeme mit veränderten Kosten und veränderten Kapazitäten vorteilhafter sein. Durch eine Veränderung der Entscheidung bzgl. der Eigen- bzw. Fremdfertigung von Komponenten und der technischen Systeme kann eine veränderte Zuordnung von Produkten zu Produktionsstandorten Kostenvorteile bringen.

⁴⁸ So hat die kostenoptimale Auswahl der geeigneten Lieferanten Einfluss auf die Transport- und Lagerkosten, die wiederum den Einstandspreis der zugekauften Bauteile bestimmen. Die Entscheidung, welche Produkte an welchen Produktionsstandorten produziert werden, beeinflusst neben den Herstellkosten in den am Standort befindlichen Arbeitssystemen auch die Transport- und Lagerkosten, sowohl im externen als auch im internen Netzwerk. Die Transport- und Lagerkosten beeinflussen wiederum die Entscheidung, welche Komponenten selbst erstellt und welche zugekauft werden und damit auch die Herstellkosten in den Arbeitssystemen.

⁴⁹ z.B. 10²⁷ unterschiedliche Varianten bei der Mercedes C-Klasse 2003 [BH03]

sionierung der internen Produktionslogistik⁵⁰ (Kapitel 2.3.3). Die drei Verfahren werden in ein hierarchisches Planungsmodell integriert⁵¹. In dieser Arbeit wird für die Koordination der unterschiedlichen Planungsverfahren im hierarchischen Planungsmodell der Ansatz von Schneeweiß genutzt, der in seiner Arbeit einen konzeptionellen Rahmen für die hierarchische Modellierung von Planungsproblemen entwirft [Sch94]. Dabei werden in übergeordneten Modellen antizipierte Informationen aus nachgelagerten Modellen verwendet. Nach der Lösung der Modelle auf den oberen Stufen werden bestimmte Entscheidungen fixiert und als Instruktionen an die nachgelagerten Modelle übergeben. Weiterhin schlägt Schneeweiß die Nutzung von Rückkopplungen vor, die eine erneute Planung der übergeordneten Modelle anstoßen, insofern Informationen aus den nachgelagerten Modellen falsch antizipiert wurden.

2.3.1 Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks

Bei der Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks sind Entscheidungen bezüglich der Eigenfertigung bzw. des Fremdbezugs von Komponenten (inkl. der Wahl der Zulieferer), der Wahl von geeigneten Produktionskonzepten und der Zuordnung der Komponenten zu den Arbeitssystemen, sowie der Auswahl von Lagern und von Speditionen für den kostenoptimalen Transport zwischen den Knoten des Netzwerks zu treffen. Voraussetzung für die Entscheidung, welche Komponenten zugekauft und welche selber produziert werden (Make-or-Buy), ist eine Vorauswahl der Komponenten, die für eine Fremdvergabe in Betracht kommen. Hierbei spielt neben möglicher zu erzielender Kostenvorteile die strategische Ausrichtung des Unternehmens eine Rolle⁵². Des Weiteren bedarf es einer Identifikation möglicher Lieferanten, die qualifiziert sind, die entsprechenden Komponenten in der geforderten Qualität zu liefern. Für jeden Lieferanten müssen sowohl Kosten⁵³ als auch Kapazitäten ermittelt werden. Existieren für Inputfaktoren Rabattstufen bei einem Lieferanten, so ist sowohl die Mindestbestellmenge als auch der dazugehörige Einkaufspreis je Rabattstufe zu be-

⁵⁰ Die gleichzeitige Planung der internen Produktionslogistik und des externen Unternehmensnetzwerks führt zu einer starken Erhöhung der Anzahl der Knoten im gesamten Produktionsnetzwerk, was bei großen Probleminstanzen nur schwer lösbar ist.

⁵¹ Die Aufteilung einer Planungsaufgabe in mehrere Verfahren, die dann mit Hilfe der hierarchischen Planung gelöst werden, dient der Reduzierung der Planungskomplexität und damit der benötigten Lösungszeit [Sta96].

⁵² So sollten beispielsweise Komponenten, die Teil des Kerngeschäfts eines Unternehmens sind, nie an externe Lieferanten vergeben werden, um einen Know-How-Verlust zu vermeiden.

⁵³ Bestehend aus Einkaufspreisen sowie Einmal- und Fixkosten für den Aufbau und die Pflege der Lieferantenbeziehung

stimmen⁵⁴. Bei einigen Zulieferern ist der Abschluss eines Rahmenvertrags sinnvoll⁵⁵, in dem sowohl den Zeithorizont der Zusammenarbeit als auch Mindestbestellmengen und Anlieferaufteilungen⁵⁶ enthalten sind [GDL05]. Für jede Komponente sollte außerdem eine Mindest- bzw. eine Maximalanzahl an Zulieferern festgelegt werden, von denen die Komponente bezogen werden darf⁵⁷.

Eine Menge an möglichen Arbeitssystemen an unterschiedlichen Standorten des Unternehmensnetzwerks bildet die Grundlage für die Planung der eigenen Produktion. Für jedes Arbeitssystem sind mögliche technische Konzepte, im Folgenden Produktionskonzepte genannt, zu erstellen⁵⁸. Auch bei Arbeitssystemen mit bestehenden Produktionskonzepten kann die Erstellung neuer Produktionskonzepte sinnvoll sein⁵⁹. Ein Produktionskonzept eines Arbeitssystems besteht aus einer Menge an Maschinen, einer Menge an Personal und einer Menge an möglichen Transformationen. Die Kapazität eines Produktionskonzepts ergibt sich aus dem Minimum aus vorhandener Maschinen- und vorhandener Personalzeit. Mit Hilfe von Kapazitätsstufen kann die Kapazität während des Betrachtungszeitraums angepasst werden⁶⁰. Durch Rüst- und Losanlaufverluste reduziert sich die Kapazität der Produktionskonzepte, was durch einen linearen Zusammenhang abgebildet wird⁶¹. Für jede Transformation existiert ein Plan, welche Maschinenzeiten (inkl. Maschinenkonfiguration) und welche manuellen Tätigkeiten benötigt werden, woraus sich der Kapazitätsbedarf für die durch die Transformation erstellten Outputfaktoren ableiten lässt. Für den Wechsel zwischen den Kapazitätsstufen⁶² sowie für die Zuordnung neuer Komponenten zu den Produktionskonzepten fallen Einmalkos-

⁵⁴ Bei einem Einkauf gilt dann immer der niedrigste Preis aller Rabattstufen, deren Mindestbestellmengen überschritten wurden.

⁵⁵ Diese Rahmenverträge dienen dazu, unvorhergesehene Risiken entgegenzuwirken und beiden Vertragsparteien zu mehr Planungssicherheit zu verhelfen [Sue07].

⁵⁶ Die Anlieferaufteilung legt fest, auf wie viele Lieferungen die Anlieferung der gekauften Komponenten verteilt wird (z.B. 2 Lieferungen je Monat).

⁵⁷ Hierbei wird meist zwischen dem „Single Sourcing“ und dem „Multiple Sourcing“ unterschieden. Beim „Single Sourcing“ beschränkt sich die Anzahl möglicher Lieferanten je Komponente auf einen. Diese Art der Beschaffung ist durch eine langfristig angelegte Partnerschaft und eine hohe Einbindung des Lieferanten in das Unternehmen charakterisiert. Beim „Multiple Sourcing“ können Komponenten bei beliebig vielen Lieferanten bezogen werden. Die Zusammenarbeit ist meist einmalig oder nur kurz und es wird versucht, kurzfristig Preisvorteile auszunutzen. Neben diesen beiden Beschaffungsarten gibt es vielfältige Zwischenformen, z.B. das „Double Sourcing“ [Wer08].

⁵⁸ Auch für Arbeitssysteme mit Fließlinienfertigung müssen Produktionskonzepte erstellt werden, deren Kosten und Kapazitäten jedoch lediglich abgeschätzt und im nachfolgenden Verfahren genau bestimmt werden.

⁵⁹ Durch die Reduzierung der Variantenanzahl in einem Arbeitssystem kann beispielsweise ein manueller Arbeitsschritt aufgrund der geringeren technischen Anforderungen durch einen automatisierten ersetzt werden, was zur Erstellung eines alternativen Produktionskonzepts führt.

⁶⁰ z.B. durch zusätzliche Maschinen und Einstellungen bzw. Entlassungen von Personal

⁶¹ Die Höhe der Kapazitätsreduktion muss im Vorfeld für jede Komponente abgeschätzt werden.

⁶² Die Erstellung eines Produktionssystems wird durch den Wechsel von der Kapazitätsstufe 0 abgebildet.

ten an. Des Weiteren sind Fixkosten für den Betrieb der Produktionskonzepte in den Kapazitätsstufen sowie variablen Kosten notwendig⁶³.

Zur Planung des Transportnetzwerks bedarf es einer Auswahl möglicher Lager, die entweder selber oder von externen Dienstleistern betrieben werden sollen. Für jedes Lager muss dabei die Menge von zusätzlichen Operationen festgelegt werden, die in diesem Lager durchgeführt werden können. Ein Lager hat dabei eine gewisse Lagerkapazität und eine Kapazität für die Durchführung von Operationen. Kapazitätsstufen ermöglichen die Anpassung der Lagerkapazität während des Betrachtungszeitraums. Für die Errichtung und den Betrieb der Lager sowie für die Durchführung von Operationen sind die notwendigen Kosten⁶⁴ zu bestimmen. Für jedes Lager muss außerdem festgelegt werden, ob es die Sicherungsfunktion für einen Produktionsstandort übernehmen kann und wie hoch die entsprechenden Sicherheitsbestände für den jeweiligen Produktionsstandort sein sollen.

Um einen kostenoptimalen Transport zu gewährleisten, bedarf es einer Auswahl möglicher Speditionen. Für jede Spedition müssen dabei die Kosten⁶⁵ und die Transportkapazitäten bestimmt werden⁶⁶. Die Kapazität von externen Speditionen kann während des Betrachtungszeitraums mit Hilfe von Kapazitätsstufen erweitert werden. Für jede Kapazitätsstufe sind wiederum die unterschiedlichen Kosten zu bestimmen. Zur Berechnung der Kapitalbindungskosten bei Transporten ist zusätzlich die Bestimmung der Transportzeiten je Spedition und Kante notwendig. Bei der Zusammenarbeit mit Speditionen können wie bei den Zulieferern Rahmenverträge bestehend aus Vertragslaufzeiten und Mindesttransportmengen abgeschlossen werden. Für jede Kante im externen Unternehmensnetzwerk sind Frequenzen festzulegen, in denen Transporte stattfinden können⁶⁷. Je Frequenz und Kante bedarf es einer Abschätzung über die durchschnittliche Transportauslastung der Transportmittel.

Die beschriebenen Voraussetzungen für die Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks sind nicht Bestandteil des Planungsmodells und dienen lediglich als Eingabedaten. Die entsprechenden Daten werden daher im Folgenden als gegeben angenommen.

Das Planungsmodell zur Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks muss die kostenoptimale Auswahl von zuzukaufenden Komponenten ermöglichen. Darüber hinaus ist zu entscheiden, bei welchen Zulieferern die Komponenten in welchen Mengen gekauft werden. Hierbei ist sicherzustellen, dass die ausgewählten Rahmenverträge, die Kapazitäten der Zulieferer und die Begrenzung der An-

⁶³ z.B. für den Verbrauch von nicht in der Planung berücksichtigten Materialien wie Strom

⁶⁴ jeweils bestehend aus Einmal-, Fix- und variablen Kosten

⁶⁵ bestehend aus den Einmalkosten, den Fixkosten und den variablen Transportkosten

⁶⁶ Bei internen Speditionen werden die Kosten und Kapazitäten je Transportmittel bestimmt.

⁶⁷ Die Transportfrequenzen dienen dabei lediglich der Abschätzung der Transport- und der Lagerkosten.

zahl an Zulieferern je Komponente eingehalten werden. Für alle Komponenten, die selbst erstellt werden sollen, muss festgelegt werden, in welchem Arbeitssystem, mit welchem Produktionskonzept und in welchen Mengen diese Komponenten gefertigt werden. Dabei ist die Abbildung einer mehrstufigen Stückliste notwendig. Für die Bestimmung des kostenoptimalen Transportnetzwerks sind zu nutzende Lagerstandorte auszuwählen und es muss entschieden werden, welche Operationen für welche Komponenten in diesen Lagern ausgeführt werden. Außerdem ist festzulegen, in welchen Lagern die Sicherheitsbestände für die unterschiedlichen Produktionsstandorte vorgehalten werden. Daneben muss das Planungsmodell die Auswahl der Speditionen, die die Transporte der Komponenten vom Zulieferer zu den Produktionsstandorten, zwischen den Produktionsstandorten und von den Produktionsstandorten zu den Märkten übernehmen, ermöglichen. Dabei ist festzulegen, welche Mengen von welchem Spediteur auf welcher Kante und mit welcher Frequenz transportiert werden, woraus die Lagermenge in den unterschiedlichen Lagerstandorten resultiert. Bei allen Entscheidungen ist sicherzustellen, dass die vorhandenen Kapazitäten nicht überschritten werden. Sind für Produktionskonzepte, Lagerstandorte oder Speditionen unterschiedliche Kapazitätsstufen wählbar, so ist zu entscheiden, welche Kapazitätsstufe in welcher Periode aktiviert werden soll. Bei den Produktionskonzepten ist darauf zu achten, dass sich die Kapazität durch Rüstvorgänge und Losanlaufverluste reduziert. Das resultierende Netzwerk muss die Bestimmung der Kosten der Gleichteilestrategie ermöglichen⁶⁸.

2.3.2 Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung

Bei der Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung sind die Anzahl an notwendigen Fließbandarbeitern, die Anzahl an notwendigen Maschinen und die Anzahl notwendiger Springer sowie deren Einsätze zu bestimmen. Besteht die Möglichkeit, in einem Arbeitssystem mit mehreren parallelen Fließlinien ein oder mehrere sehr ähnliche Komponenten oder Endprodukte herzustellen, so ist der optimale Produktmix auf den unterschiedlichen Fließlinien festzulegen. Dabei müssen die unterschiedlichen Varianten der Komponenten oder Endprodukte so auf die unterschiedlichen Linien verteilt werden, dass das Produktionsprogramm jeder Linie möglichst homogen bezüglich der Arbeitsbelastungen ist. Es ist darauf zu achten, dass alle notwendigen Ressourcen zur Produktion der zugeordneten Produkte vorhanden sind. Da die Varianten der Outputfaktoren zu sehr unterschiedlichen Belastungen auf den Arbeitsplätzen führen, ist ein geeignetes Ähnlichkeitsmaß zu definieren, anhand dessen die

⁶⁸ Lediglich die Kosten für Arbeitssysteme mit Fließlinienfertigung und für die interne Produktionsversorgung werden in den nachgelagerten Planungsverfahren bestimmt.

Varianten auf die Linien verteilt werden. Das zu entwickelnde Verfahren muss darüber hinaus die Bestimmung der notwendigen Ressourcen der einzelnen Fließlinien ermöglichen⁶⁹.

Nach der Festlegung des Produktmix auf den Fließlinien bedarf es einer Austaktung, deren Ziel es ist, die AVos so auf die unterschiedlichen Arbeitsplätze zu verteilen, dass die Kosten für reguläre Arbeitskräfte und Arbeitsunterstützer minimiert werden⁷⁰. Aus der Austaktung der Linien sind die notwendigen Personalkosten je Linie, sowohl für reguläre Arbeiter als auch für Springer, abzuleiten. Bei der Austaktung ist jedoch zu beachten, dass die Reihenfolge der AVos den sogenannten Vorranggraph nicht verletzt. Der Vorranggraph gibt alle technischen Vorrangbeziehungen⁷¹ zwischen den AVos an. In der Praxis liegt ein Vorranggraph jedoch oft nicht in elektronischer Form vor⁷², weshalb die Unterstützung von Experten notwendig ist.

Sowohl für die Austaktung als auch für die Aufteilung der Varianten auf parallele Fließlinien wird ein sogenanntes Plan-Produktionsprogramm benötigt. Ein Plan-Produktionsprogramm ist eine repräsentative Menge von Endprodukten, wobei die Bauraten aller Ausprägungen der Differenzierungsmerkmale den vom Vertrieb prognostizierten Bauraten entsprechen.

2.3.3 Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik

Ziel der Planung der internen Produktionslogistik ist es, die Versorgung der Produktion mit den notwendigen Komponenten kostenoptimal sicherzustellen. Voraussetzung sind die Ergebnisse der beiden vorgelagerten Planungsverfahren⁷³. Die Planung erfolgt dabei separat für jeden Produktions- bzw. Logistikstandort.

Die dem Standort zugeordneten Arbeitssysteme sind im Rahmen einer Layout-Planung an den Produktionsstandorten anzuordnen⁷⁴. Ebenso bedarf es der Positionierung der Wareneingänge und Warenausgänge. Außerdem sind mögliche Orte auszuwählen, an

⁶⁹ Die notwendigen Ressourcen einer Fließlinie ergeben sich aus den ihr zugeordneten Produkten.

⁷⁰ Auch bei einer schon bestehenden Zuteilung von AVos zu Arbeitsplätzen ist eine Austaktung notwendig, denn durch die Verwendung von Gleichteilen verändert sich die Anzahl der Durchführungen der AVos. Dies kann zu einer Veränderung der Anzahl benötigter Arbeitskräfte und des entstandenen Taktungleichs führen.

⁷¹ z.B. AVo x muss immer vor AVo y durchgeführt werden.

⁷² Die erstmalige Erstellung eines Vorranggraphen in einem Computersystem ist mit hohem Aufwand realisierbar. Allerdings ist die Pflege des Vorranggraphen aufgrund von häufigen Änderungen bei den Arbeitsvorgängen sehr arbeitsintensiv, weshalb er in der Praxis oft nicht vorliegt [Alt09].

⁷³ insb. die dem betrachteten Standort zugeordneten Arbeitssysteme inkl. der darauf zu fertigenden Produkte, sowie die zu Transportmengen zwischen den Arbeitssystemen und den Warenein- bzw. Warenausgängen

⁷⁴ Dadurch wird festgelegt, an welchen Orten die Inputfaktoren benötigt und die Outputfaktoren abtransportiert werden müssen.

denen ein Lagersystem erstellt werden kann. Bei der Planung der Lagersysteme sollten sowohl unterschiedliche technische Realisierung als auch unterschiedliche Kapazitäten in Betracht gezogen werden. Dabei können auch mehrere alternative Lagersysteme für einen Lagerstandort bestimmt werden, aus denen nur ein Standort ausgewählt werden darf. Außerdem müssen für alle Transportwege im internen Standortnetzwerk mögliche Transportsysteme bestimmt werden. Ein Transportsystem hat dabei immer ein Start-Lagersystem und kann über verschiedene Routen eine gewisse Zahl an Ziel-Lagersystemen ansteuern. Für alle Transportsysteme sind die notwendigen Kosten und Kapazitäten zu ermitteln. Dabei wird zwischen routenunabhängigen und routenabhängigen Kosten unterschieden. Bei un stetigen Transportsystemen bedarf es zusätzlich der Ermittlung von Kosten und Kapazitäten für einzelne Transportmittel. Für alle Lager- und Transportsysteme ist festzulegen, welche Operationen in diesen Systemen durchgeführt werden können⁷⁵ und welche Kapazität für die Operationen zur Verfügung steht. Hierfür sind ebenfalls die entsprechenden Kosten zu bestimmen. Die beschriebenen Eingabedaten werden wie beim ersten Teil des Planungsmodells als gegeben angenommen.

Ziel des Planungsverfahrens ist die kostenoptimale Auswahl der Lager- und Transportsysteme. Für jede betrachtete Komponente ist festzulegen, mit Hilfe welcher Transportsysteme sie transportiert und in welchen Lagersystemen sie zwischengelagert wird. Neben der Auswahl der Transportsysteme sind die Routen zu bestimmen, auf denen ein Transportsystem eingesetzt wird. Außerdem müssen alle notwendigen Operationen auf die Systeme verteilt werden. Dabei ist sicherzustellen, dass exklusive Operationen genau einem Transport- oder Lagersystem zugeordnet werden. Es ist darauf zu achten, dass die zur Verfügung stehenden Lager-, Transport- und Operationskapazitäten eingehalten werden. Es muss die Abbildung alternative technische Gestaltungen für Lager- oder Transportsysteme ermöglicht werden, aus denen jeweils nur ein System ausgewählt werden darf. Zur Unterstützung der Layout-Planung sollte das Planungsverfahren eine Bewertung unterschiedlicher Layout-Alternativen zur Anordnung der Arbeitssysteme ermöglichen. Mit Hilfe des resultierenden internen Produktionslogistiknetzwerks sind die entsprechenden Herstellkosten abzuleiten.

⁷⁵ Die Operationen, die an einem Produktionsstandort durchgeführt werden müssen, bestimmen sich aus dem Ergebnis der Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks.

3 Stand der Forschung

3.1 Stand der Forschung bei Verfahren zur Bewertung von Gleichteilestrategien

In diesem Abschnitt werden die Verfahren beschrieben, die sich mit der Bewertung von Gleichteilestrategien befassen⁷⁶. Dabei wird gezeigt, dass keines der Verfahren den in Kapitel 2 beschriebenen Anforderungen entspricht und daher ein Handlungsbedarf bei der Bewertung von Gleichteilestrategien besteht.

3.1.1 Bewertung von Gleichteilestrategien mit dem Fokus auf den Sicherheitsbestandskosten

Einer der ersten Ansätze zur Minimierung des Sicherheitsbestands mit Hilfe von Gleichteilen stammt von Baker [Bak85]. Er geht dabei von einer Menge von Vorprodukten aus, die in einem letzten Arbeitsschritt in eine Menge von Endprodukten verbaut wird. Die Produktion der Endprodukte erfolgt nach Auftragseingang, während für die Produktion der Vorprodukte auf Prognosen zurückgegriffen wird. Dabei wird angenommen, dass die Produktion aller Produkte innerhalb einer Periode abgeschlossen werden kann, Vorprodukte aber nicht in der gleichen Periode gefertigt werden können in der sie in das Endprodukt verbaut werden. Die Produktion von Vorprodukten erfolgt daher an Hand einer Prognose. Baker beschreibt den Zusammenhang zwischen einem gewünschten Servicegrad⁷⁷ für die Endprodukte und der Höhe des Sicherheitsbestands und zeigt den Einfluss von Gleichteile auf die Höhe des Sicherheitsbestands auf.

In einer nachfolgenden Arbeit formulieren Baker et al. das beschriebene Problem für zwei Endprodukte als mathematisches Modell mit dem Ziel, die Lagerbestände zu minimieren [BMN86]. Gerchak et al. erweitern das Modell von Baker et al. um die Betrachtung von Preisen und Kosten und um die Möglichkeit, beliebige Verteilungen in der Prognose zu verwenden [GMG88]. Außerdem ermöglichen sie die Betrachtung von beliebig vielen Endprodukten. Auch Eynan et al. bauen auf dem Modell von Baker auf und zeigen, dass die Verwendung von Gleichteilen nicht immer sinnvoll ist, wenn der Preis des Gleichteils den der Einzelkomponenten übersteigt [ER96].

Gerchak et al. entwickeln aufbauend auf ihrer vorherigen Arbeit ein stochastisches Modell, dass die Auswirkungen von Gleichteilen auf die Bestände über mehrere Perioden

⁷⁶ Bei vielen der Ansätze erfolgt neben der Bewertung auch eine Optimierung der Gleichteilestrategie.

⁷⁷ Der Servicegrad gibt an, wie viele Prozent der Nachfrage nach einem Produkt bei einer vorgegebenen statistischen Verteilung im Durchschnitt befriedigt werden müssen.

bewertet [GH89]. Hillier untersucht in seiner Arbeit inwieweit Gleichteile für die auftragsbezogene Fertigung von Vorteil sind [Hil00]. Auch er betrachtet in seinem Ansatz mehrere Perioden. Allerdings untersucht er dabei nur die beiden Extreme „nur Gleichteile“⁷⁸ und „keine Gleichteile“. Hillier betrachtet in seinem Modell die Produktions- bzw. Einkaufskosten, die Kosten für nicht erfüllte Nachfrage und die Lagerhaltungskosten. In einer späteren Arbeit erweitert Hillier sein Modell um die Möglichkeit, Gleichteile als Backup einzusetzen [Hil02]. Dabei werden weiterhin variantenbehaftete Bauteile genutzt, jedoch wird der Sicherheitsbestand durch Gleichteile abgedeckt, wodurch die Sicherheitsbestände gesenkt werden können.

Song et al. entwickeln ein dynamisches Modell zur Bewertung des Einflusses von Gleichteilen auf den Sicherheitsbestand unter Berücksichtigung von Wiederbeschaffungszeiten [SZ09]. Sie beschränken sich auf die Betrachtung der variablen Kosten für den Sicherheitsbestand. Die Produktion ist auftragsbezogen und erfolgt nach Auftragsingang. Allerdings darf ein Produkt nur dann gefertigt werden, wenn alle notwendigen Komponenten im Lager vorliegen. Ist dies nicht der Fall, werden Aufträge zurückgestellt. Die Produktion des zurückgestellten Auftrags erfolgt, sobald alle notwendigen Komponenten vorliegen. Mit Hilfe ihres dynamischen Modells überprüfen Song et al. die Kostenvorteile bei den Sicherheitsbestandskosten durch den Einsatz von Gleichteilen.

3.1.2 Bewertung von Gleichteilestrategien an einem Produktionsstandort

Köhler beschreibt in seinem Ansatz die Abschätzung der variantenabhängigen Kosten mit Hilfe von empirisch ermittelten Kostenverläufen [Köh88]. Die Datenbasis hierfür wird dabei entweder abgeschätzt, erfasst oder simuliert. Anschließend wird mit Hilfe von statistischen Verfahren, meist der Regressionsrechnung, der Funktionsverlauf bestimmt. Ein Kostenverlauf ist dabei immer nur für eine Gruppe von Produkten oder für einen bestimmten Bereich der Bezugsgröße⁷⁹ gültig. Köhler beschreibt dafür dispositionsbedingte, produktbedingte und fertigungsbedingte Merkmale, an Hand derer der Gültigkeitsbereich der Kostenfunktion festgelegt werden kann. Die so ermittelten Funktionen erlauben es, die Auswirkungen von Gleichteilen auf die Produktion und die innerbetriebliche Logistik zu bewerten.

⁷⁸ Beim Einsatz von Gleichteilen werden alle Varianten einer Komponente durch das Gleichteil ersetzt.

⁷⁹ z.B. für einen bestimmten Losgrößenbereich

Fischer et al. beschreiben in ihrer Arbeit die Auswahl von Gleichteilen am Beispiel der Vorderradbremzen bei Automobilen⁸⁰ [FRU99]. Sie stellen einen Netzwerkalgorithmus vor, der die Gleichteilestrategie mit den geringsten Gesamtkosten, bestehend aus Fixkosten⁸¹ und variable Kosten, ermittelt. Aufbauend auf dieser Arbeit entwickeln Ramdas et al. ein mathematisches Modell zur Bestimmung der kostenoptimalen Gleichteilestrategie [RFU03]. Thonemann et al. beschreiben in ihrer Arbeit ebenfalls ein mathematisches Modell zur Bestimmung des optimalen Gleichteilegrads einer Komponente [TB00]. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Ausstattungsmerkmale der zugeordneten Varianten alle Ausstattungsmerkmale des Endprodukts erfüllt⁸². Die Zielfunktion des Modells besteht aus den Kosten für die Produktion, die Lagerhaltung, das Rüsten und die Komplexität. Während die Produktionskosten nur von der Anzahl der verwendeten Varianten abhängen, leiten sich die Rüst- und die Lagerkosten von den Losgrößen und den Bestellpunkten ab. Die Losgrößen und Bestellpunkte berechnen Thonemann et al. je nach Bedarfsmenge jeder Variante. Die Komplexitätskosten ergeben sich aus einer linearen Funktion über die Anzahl an Varianten aller Komponenten⁸³. Heese et al. beschreiben ein Modell zur Bestimmung des optimalen Gleichteilegrads bei zwei Endprodukten [HS06]. Eines der Produkte ist dabei von hoher und eines von niedriger Qualität. Für jede Komponente der Produkte können entweder zwei unterschiedlichen Varianten oder ein Gleichteil genutzt werden. Für die Gleichteile wird festgelegt, welche Qualitätsanforderungen die Gleichteile erfüllen sollen. Ziel ist es, den Unternehmensgewinn⁸⁴ zu maximieren. Die Verkaufsmenge wird durch die Qualität der verbauten Komponenten beeinflusst. Auch Jans et al. präsentieren mathematisches Modell zur Gewinnmaximierung durch die Verwendung von Gleichteilen [JDS08]. Dabei betrachten Jans et al. die Erlöse aus dem Verkauf der Produkte und die Kosten für Produktion und Entwicklung. Der Verkaufspreis ergibt sich aus den um einen bestimmten Prozentsatz erhöhten Produktionskosten. Die Nachfrage ist flexibel und wird über eine Preiselastizitätsfunktion berechnet. Die Restriktionen des Modells stellen sicher, dass jedem Produkt alle notwendigen Komponenten zugewiesen werden und die Produktanforderungen erfüllt werden.

⁸⁰ Für jede Varianten eines Automobils muss eine Vorderradbremse, bestehend aus Bremsscheibe und Bremssattel inkl. Bremsklötze, ausgewählt werden. Bei der Zuordnung der Komponenten zu den unterschiedlichen Automobilvarianten muss gewährleistet sein, dass die notwendige Bremsleistung entsprechend des Fahrzeuggewichts erbracht wird.

⁸¹ für die Entwicklung der Varianten

⁸² z.B. muss die Bremsleistung der Bremsscheibe der notwendigen Bremsleistung für das entsprechende Automobil entsprechen

⁸³ Die Herleitung der Variantenkosten einer Komponente wird hierbei nicht näher erläutert.

⁸⁴ Der Erlös ergibt sich dabei aus der Menge an verkauften Produkten der jeweiligen Qualität und dem dazugehörigen Preis, während sich die Kosten aus dem qualitätsabhängigen Preis der verbauten Komponenten ergeben.

Boysen et al. präsentieren in ihrer Arbeit ein Framework zur Optimierung des Gleichteilgrades für unterschiedlichen Problemstellungen [BS09]. Sie stellen hierfür ein mathematisches Modell vor, bei dem einer Menge von Produkten jeweils eine Variante einer Komponente zugeordnet wird. Dabei müssen die Ausstattungsmerkmale des Produkts den Ausstattungsmerkmalen der Komponenten entsprechen. Die Ausstattungsmerkmale sind dabei abwärtskompatibel⁸⁵. Die Zielfunktion des Modells beinhaltet sowohl fixe Kosten für die Entwicklung einer neuen Komponente, als auch variable Produktions- bzw. Einkaufskosten.

3.1.3 Bewertung der Herstellkosten im Produktions- und Transportnetzwerk

Radall et al. untersuchen in ihrer Arbeit die Frage wie die Variantenvielfalt die Netzwerkstruktur beeinflusst [RU01]. Sie unterteilen hierbei die Variantenvielfalt in produktionsdominant und distributionsdominant. Eine produktionsdominante Variantenvielfalt erzeugt erhöhte Kosten in der Produktion, während die distributionsdominante Variantenvielfalt zu erhöhten Kosten in der Lagerhaltung, dem Marketing und der Nicht-Erfüllung von Kundenaufträgen führt. Randall et al. zeigen in der Arbeit, dass bei einer produktionsdominanten Variantenvielfalt eine zentrale Produktion vorteilhaft ist, wo sich erhöhte Skaleneffekte erzielen lassen. Firmen mit einer distributionsdominanten Variantenvielfalt sollten ihre Produktion hingegen zu den entsprechenden Märkten verlegen um damit schneller auf Nachfrageänderungen reagieren zu können und somit Sicherheitsbestände zu reduzieren und den Servicegrad zu erhöhen. Die Bewertung, ob die Variantenvielfalt einer Firma produktions- oder distributionsdominant ist, erfolgt hierbei mit Hilfe von Expertenbefragungen.

In der Arbeit von Thonemann et al. aus dem Jahr 2002 wird ein Modell entwickelt, das den Zusammenhang zwischen Variantenvielfalt und Netzwerk-Performance bewerten kann [TB02]. Das betrachtete Netzwerk besteht dabei aus einem Produzenten und mehreren Händlern. Trifft eine Nachfrage bei einem Händler ein, so wird diese Nachfrage, insofern möglich, aus dem Lager des Händlers befriedigt. Ist der Lagerbestand hierfür nicht ausreichend, so wird die Bestellung zurückgestellt. Die Produktion von Produkten erfolgt unter Zuhilfenahme einer Prognose. Thonemann et al. entwickeln ein Modell, bei dem die Beschaffungszeit eines Produkts in Abhängigkeit der Variantenvielfalt ermittelt wird. Hierfür wird von identischen Losgrößen, von einer konstanten Produktionszeit je Produkt, von konstanten Rüstzeiten und von konstanten Transportzeiten zu allen Händlern ausgegangen. Anschließend werden die minimalen Kosten der Händler

⁸⁵ So kann beispielsweise eine Batterie mit einer höheren Kapazität in eine Automobil mit niedrigerer Batteriekapazitätsanforderung verbaut werden.

ermittelt. Diese Kosten bestehen aus Produktionskosten, den Lagerbestandskosten und den Kosten für die Zurückstellung von Aufträgen.

Auch Qian et al. untersuchen in ihrer Arbeit die Auswirkungen von Gleichteilen auf das Produktions- und Transportnetzwerk [QK08]. Sie entwickeln hierfür ein Modell, bei dem Netzwerk aus Stufen besteht. Dabei gibt es drei Arten von Stufen: die Zulieferer-stufen, die Montagestufen und die Verkaufsstufen. Die Verkaufsstufen müssen die Nachfrage nach allen Produkten erfüllen. Für die anderen beiden Stufenarten gilt, dass eingehende Aufträge sofort zu bearbeiten sind. Die betrachteten Kosten im Netzwerk sind Lagerhaltungs-, Produktions- und Zinskosten, sowie die Erträge für verkaufte Produkte. Die Höhe der verkauften Produkte ist abhängig vom angesetzten Preis. Im Modell wird entschieden, welche Gewinnmarge auf welcher Stufe des Netzwerks erzielt werden kann, so dass der Gesamtgewinn optimiert wird.

Danne beschreibt in seiner Arbeit ein Vorgehen zur Bewertung unterschiedlicher Gleichteilestrategien in der Konsumgüterindustrie [Dan09]. Die von ihm betrachteten Konsumgüter haben im Gegensatz zu den in dieser Arbeit betrachteten variantenreichen Serienprodukten einen sehr geringen Wert. Außerdem werden die Produkte mit Hilfe einer Prognose kundenneutral hergestellt. Die fertigen Produkte werden zu unterschiedlichen Vertriebsgesellschaften transportiert und von dort an die Kunden ausgeliefert. Da in der Konsumgüterindustrie die Nachfrage in der Regel in 1-2 Tagen befriedigt werden muss und die Prognosen nicht genau sind, sind hohe Sicherheitsbestände notwendig. Die Variantenvielfalt in der Konsumgüterindustrie beeinflusst laut Danne hauptsächlich die Lagerhaltungskosten und die Rüstkosten, die für ein gegebenes Produktionsprogramm mit einer vorgegebenen Variantenvielfalt mit Hilfe eines zweistufigen Verfahrens minimiert werden. Im ersten Teil seines Verfahrens werden die Lagerstandorte für die Endprodukte bestimmt und die Höhe des Sicherheitsbestands für diese Endprodukte wird festgelegt. Dabei betrachtet Danne das gesamte Produktions- und Distributionsnetzwerk bestehend aus den Fabriken und den Distributionslagern und kann dadurch entscheiden, welche Distributionslager bei einer bestimmten Variantenvielfalt wirtschaftlich sinnvoll sind. Im zweiten Teil des Verfahrens wird die Höhe der unterschiedlichen Planungspuffer bestimmt. Diese Planungspuffer ermöglichen eine verbesserte Produktionsreihenfolge und dienen somit der Reduktion der Rüstkosten, verursachen jedoch eine erhöhte Wiederbeschaffungszeit. Je nach Höhe des Planungspuffers können die optimalen Losgrößen mit der dazugehörigen Produktionsreihenfolge bestimmt werden. Die Planung der Planungspuffer, der optimalen Losgrößen und der Produktionsreihenfolge erfolgt simultan.

3.1.4 Zusammenfassung

Alle in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Verfahren gehen von einer einstufigen Produktion aus. Während in den Modellen von Gerchak et al. und Eynan et al. lediglich die Kosten für den Aufbau des Sicherheitsbestands betrachtet werden, bilden Hillier et al. und Song et al. zusätzlich die Lagerhaltungskosten und die Kosten für nicht erfüllte Nachfrage ab. Die Auswirkungen von Gleichteilestrategien auf die weiteren in Kapitel 2.1.2 beschriebenen variantenabhängigen Kosten werden nicht betrachtet.

Auch die Optimierungsverfahren aus Kapitel 3.1.2 ermöglichen nur die Abbildung einer einstufigen Produktion. Des Weiteren werden keine Kapazitätsbeschränkungen und somit auch keine sprungfixen Kosten betrachtet. Außer bei Thonemann et al. wird sich auf die Modellierung von Fixkosten für die Entwicklung und variable Produktions- bzw. Einkaufskosten beschränkt. Thonemann et al. betrachten zusätzlich Rüstkosten sowie weitere variantenabhängige Kosten, deren Bestimmung jedoch nicht näher erläutert wird. Köhler, dessen Verfahren eine Bewertung statt einer Optimierung von Gleichteilestrategien ermöglicht, bildet alle variantenabhängigen Kosten in der Produktion und der innerbetrieblichen Logistik ab. Durch die Nutzung von Gültigkeitsbereichen für die ermittelten Kostenfunktionen können auch sprungfixe Kosten abgebildet werden. Allerdings basieren die von ihm hergeleiteten Kostenfunktionen auf Vergangenheitsdaten bzw. einfachen Simulationen. Ändern sich die zu produzierenden Produkte oder die eingesetzten Produktionskonzepte, so ist eine Kostenabschätzung nicht mehr möglich.

Die Arbeiten von Radall et al. und Qian et al. untersuchen den Einfluss von Gleichteilen auf das Produktions- und Transportnetzwerk im Allgemeinen, ermöglichen jedoch keine Bewertung unterschiedlicher Gleichteilestrategien. Das von Thonemann et al. 2002 entwickelte Modell betrachtet nur ein sehr vereinfachtes Netzwerk mit nur einem Produzenten und identischen Kosten und Prozesszeiten für alle Produkte. Eine Betrachtung der Beschaffungs- und Produktionslogistik fehlt im Modell. Die Anforderungen an das Verfahren von Danne und an die in Kapitel 2 beschriebene Problemstellung unterscheiden sich grundlegend. So wird in der Konsumgüterindustrie kundenneutral produziert während in der variantenreichen Serienproduktion aufgrund der enormen Anzahl unterschiedlicher Varianten bei den Endprodukten und dem deutlich höheren Preis auftragsbezogen produziert wird, wodurch Sicherheitsbestände für Endprodukte entfallen. Außerdem erfordert die Anlieferung von Komponenten aufgrund der relativ geringen Variantenvielfalt der Bestandteile der Konsumgüter keine gesonderte Planung.

Die vorgestellten Optimierungsverfahren gehen, bis auf die Arbeit von Danne, von vereinfachten Problemstellungen aus. So bewerten die Ansätze aus Kapitel 3.1.1 nur die positiven Auswirkungen von Gleichteilen auf die Bestände. Den Arbeiten aus Kapitel 3.1.2 fehlt die Betrachtung des Unternehmensnetzwerks, aber auch die Arbeiten in Ka-

pitel 3.1.3 wird nur von einem vereinfachten Netzwerk ausgegangen. Allen Ansätzen gemein ist die Fokussierung auf eine einstufige Produktion. Außerdem fehlt eine Betrachtung der Kapazitäten und damit der sprungfixen Kosten. Abgesehen von den Arbeiten von Thonemann et al. und Danne, beschränkt sich die Betrachtung der variantenabhängigen Kosten auf die Bestands- und die Entwicklungskosten. Thonemann und Danne betrachten zusätzlich die Rüstkosten. Des Weiteren fehlt die Betrachtung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung. Der Ansatz von Köhler kann Experten dabei unterstützen, die veränderten Kosten und Kapazitäten beim Einsatz von Gleichteilen zu bewerten. Allerdings sollten neben bestehenden technischen Anlagen auch neue Produktionskonzepte in Betracht gezogen werden. Der Ansatz von Danne kann aufgrund der sehr unterschiedlichen Problemstellungen nicht für die Bewertung von unterschiedlichen Gleichteilestrategien bei variantenreichen Serienprodukten genutzt werden.

3.2 Stand der Forschung bei der Strukturierung- und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Arbeiten für die Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks untersucht. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Arbeiten bezüglich ihrer Eignung für die Bereiche „Auswahl von Produktionskonzepten und Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen“, „Make-or-Buy Entscheidung und die Auswahl der Zulieferer“ und „Strukturierung und Dimensionierung des Transportnetzwerks“ untersucht.

3.2.1 Auswahl von Produktionskonzepten und Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen

Henrich beschreibt in seiner Arbeit ein mehrperiodiges Modell zur optimalen Planung des Produktions- und Transportnetzwerks eines Unternehmens [Hen02]. Er verteilt dabei die zu fertigenden Produkte so auf die unterschiedlichen Produktionswerke, dass die Gesamtkosten minimiert werden. Diese Kosten setzen sich aus den Materialbeschaffungskosten⁸⁶, den variablen Produktionskosten und den Distributionskosten zusammen. Er geht dabei von einer einstufigen Produktion aus, in der eine Menge von Vorprodukten zu einer Menge von Endprodukten verbaut wird⁸⁷. Die gefertigten Endprodukte werden anschließend zu den unterschiedlichen Märkten transportiert. In seinem Modell stellt Henrich sicher, dass die vorhandenen Kapazitäten in den unterschiedlichen Wer-

⁸⁶ siehe Kapitel 3.2.2

⁸⁷ Die von Henrich abgebildete Produktstruktur lässt dabei jedoch nur ein „eins zu eins Verhältnis“ zwischen benötigtem Vorprodukt und Endprodukt zu.

ken eingehalten werden. Neben der Zuordnung der Produkte zu den Produktionsstätten erfolgt in dem Modell auch eine Auswahl der Zulieferer⁸⁶.

Ferber erweitert das Modell von Henrich um Investitionsentscheidungen⁸⁸ [Fer05], [FFH06]. Des Weiteren ist es möglich unterschiedliche Ausbaustufen für die Produktionsstandorte zu wählen. Im Modell kann eine Budgetobergrenze für Investitionen je Periode festgelegt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Zuordnung von Produkten zu Produktionsstätten zu beschränken. Auch eine Beschränkung der Anzahl an Standorten, denen ein Produkt zugeordnet werden kann, ist möglich. Ferber stellt sicher, dass eine Mindestproduktionsmenge je Standort hergestellt wird, insofern der Standort eröffnet wurde. Im Gegensatz zum Modell von Henrich zinst Ferber die entstandenen Kosten auf die Startperiode ab. Kauder verknüpft das Modell von Ferber mit der Arbeit von Jordan und Graves⁸⁹ [Kau08]. Dadurch wird sichergestellt, dass das Modell nur Lösungen generiert, die eine flexible Zuordnungsstruktur garantieren⁹⁰. Außerdem erweitert Kauder das Modell um die Betrachtung von Wechselkursen und fixe Zuordnung von Produkten zu Produktionsstandorten zu Beginn des Betrachtungszeitraums. Die Einführung neuer Produkte an einem Produktionsstandort wird auf eine bestimmte Anzahl beschränkt.

Bundschuh präsentiert in seiner Arbeit ein umfangreiches, mehrperiodiges Modell zur Produktionsnetzwerkplanung und zur dazugehörigen Werksstruktur- und Personalplanung [Bun08]. Ziel des Modells ist die kostenoptimale Zuordnung der Produktionsmenge zu den unterschiedlichen Standorten. Im Gegensatz zu Henrich, Ferber und Kauder beschränkt sich Bundschuh jedoch nicht auf eine einstufige Produktion, sondern bildet beliebige Erzeugnisstrukturen ab. Für alle Produkte existiert ein Arbeitsplan mit durchzuführenden Prozessen. Die Produkte werden so auf die Fertigungssysteme verteilt, dass alle Prozesse des Arbeitsplans durchgeführt werden können. Dabei stellt Bundschuh sicher, dass die Kapazität der Fertigungssysteme eingehalten wird. Um ein oder mehrere Fertigungssysteme an einem Standort zu nutzen ist wiederum die Installation einer bestimmten Anlage notwendig. Die Kapazität einer Anlage berechnet Bundschuh mit Hilfe der der Anlage zugeordneten Fertigungssysteme und des in der Periode genutzten Schichtmodells. Neben der Zuordnung von Produkten und Produktionskapazitätä-

⁸⁸ In den unterschiedlichen Produktionsstandorten kann erst dann gefertigt werden, wenn die dafür notwendigen Produktionsanlagen angeschafft wurden. Die Investitionen werden in Struktur- und Produktinvestitionen unterteilt. Strukturinvestitionen fallen dabei für die Infrastruktur des Werks an (z.B. die Montagehalle). Produktinvestitionen lassen sich wiederum in stückzahlabhängige und stückzahlunabhängige Investitionen unterteilen. Die Höhe der stückzahlabhängigen Investitionen richtet sich dabei nach der maximalen Produktionsmenge in einer Periode am Produktionsstandort.

⁸⁹ siehe auch [JG95]

⁹⁰ Eine flexible Zuordnungsstruktur nach Jordan und Graves zeichnet sich dadurch aus, dass Produkte nicht nur einem Produktionsstandort zugewiesen werden und dass ein Produktionsstandort mehrere Produkte fertigen kann. Gleiches gilt für eine Gruppe von Produkten und eine Gruppe von Produktionsstandorten.

ten zu Standorten erfolgen im Modell eine Werksstruktur- und eine Personalplanung. Bei der Werksstrukturplanung überprüft Bundschuh, ob die an einem Standort befindlichen Flächen für die Installation der Zugeordneten Anlagen und Fertigungssysteme ausreichen. Bundschuh betrachtet im Modell variable Kosten für Produktion und Transport (inkl. Zoll), Einmalkosten für Grundstücke, für Gebäude, für Produktionsanlagen, für die Demontage und für Belegungswechsel und Fixkosten für Anlagenbetrieb, für Personal und für den Betrieb der Standorte.

Freiwald entwickelt ebenfalls ein mehrperiodiges Modell zur Planung eines Produktionsnetzwerks [Fre05]. Sie geht dabei von einer einstufigen Produktion aus und verteilt die zu fertigenden Produkte so auf die unterschiedlichen Produktionsstandorte, dass die Gesamtkosten minimiert werden. Dabei stellt sie sicher, dass die Kapazitäten an den Standorten ausreichen, um alle zugeordneten Produkte fertigen zu können. Sie definiert hierfür für alle Standorte Kapazitätsstufen, die während des Betrachtungszeitraums angepasst werden können. In einer Erweiterung schlägt sie außerdem die Abbildung und Planung von unterschiedlichen Anlagentypen vor. Da im Modell von Freiwald auch Lager abgebildet werden, sind Lagerbestände zwischen den Perioden möglich⁹¹. Die Gesamtkosten des Modells setzen sich aus Einmal- und Fixkosten für Produktionsstandorte und Lager, je nach Kapazität, den Einmalkosten für die Kapazitätserweiterung und den variablen Produktions-, Lager und Transportkosten zusammen.

Kriesel beschreibt ein Modell zur szenarioorientierten Produktionsnetzwerkplanung [Kri06]. Er geht von einem Szenariobaum aus, in dem jedes Szenario eine bestimmte Periode im Planungszeitraum darstellt und genau ein Vorgängerszenario in der vorhergehenden Periode und mehrere Nachfolger in der nachfolgenden Periode besitzt. In jedem Szenario ist eine Soll-Produktionsmenge definiert. Im Modell wird über die Höhe der Ist-Produktionsmenge entschieden. Die Differenz zur Soll-Menge führt zu einer Mehr- oder Minderproduktion, die Kosten in der Zielfunktion erzeugt. Für die Produktion steht eine Menge von Produktionsarten bereit, die wiederum Ressourcen benötigen. Ressourcen sind einem Standort im Produktionsnetzwerk zugeordnet. Im Modell wird entschieden, welche Produkte mit welcher Produktionsart produziert werden und wie viele Einheiten einer Produktionsart benötigt werden. Es besteht die Möglichkeit die Anzahl an Produktionsarten zu begrenzen. Die Zielfunktion des Modells beinhaltet sowohl Erlöse aus dem Verkauf der Produkte, variable Kosten für Mehr- oder Minderproduktion, Einmalkosten für den Kauf (bzw. die Stilllegung) von Ressourcen und Standorten und Fixkosten für den Betrieb von Standorten und von Ressourcen und für die Nutzung von Flächen.

Timm stellt in seiner Arbeit ein hierarchisches Planungsmodell zur Planung von Fertigungssystemen vor [Tim09]. Dabei erfolgt im ersten Modell eine Planung des Maschi-

⁹¹ Lager als Teil des Transportnetzwerks werden in Kapitel 3.2.3 näher erläutert.

nenbestands wo die Art und Menge der benötigten Fertigungsressourcen bestimmt wird. Wie bei Kriesel werden für die Herstellung von Produkten Produktionsarten (hier Technologien genannt) benötigt, die wiederum Ressourcen (hier Werkzeuge) benötigen. Ebenfalls von Kriesel wurde die Darstellung von Szenarien und Perioden mit Hilfe eines Szenariobaums übernommen. Bei der Durchführung einer Einheit einer Technologie wird eine bestimmte Menge unterschiedlicher Vorprodukte verbraucht und eine bestimmte Menge eines Produkts hergestellt. Die hergestellten Produkte können entweder weiter verbaut, verkauft oder auf Lager gelegt werden. Im Modell erfolgt außerdem eine Make-or-Buy Entscheidung. Die Restriktionen im Modell stellen sicher, dass die Anzahl der Werkzeuge ausreicht, um alle Produkte mit den entsprechenden Technologien herzustellen. Dabei werden neben der Herstellzeit auch Rüstzeiten betrachtet. Timm beschränkt die Anzahl nutzbarer Technologien durch die Verwendung von Produktionsalternativen. Des Weiteren erzeugt der Wechsel zwischen den Produktionsalternativen Kosten. Es werden Kosten für die Zuordnung von Technologien zu Werkzeugen, variable Produktionskosten, Lagerkosten, Fremdbeschaffungskosten und Einmal- und Betriebskosten für Werkzeuge betrachtet. Im zweiten Modell macht Timm eine Mitarbeiterplanung, wo sichergestellt wird, dass genügend Mitarbeiter mit einer ausreichenden Qualifikation zur Verfügung stehen. Die Modelle drei und vier sind Teil der operativen Planung und werden hier nicht näher erläutert.

Friese präsentiert ein Modell zur Planung des Produktionsnetzwerks unter Unsicherheit [Fri08]. Er definiert dafür unterschiedliche Szenarien, wobei im Gegensatz zu Kriesel und Timm ein Szenario Nachfragemengen für den gesamten Planungszeitraum enthält. Das Modell beinhaltet unterschiedliche Produktionslinien für die mehrere Kapazitätsstufen definiert werden können. Ziel des Modells ist es die Produkte so auf die Linien zu verteilen, dass die Gesamtkosten minimiert werden. Dabei können beliebige Erzeugnisstrukturen modelliert werden. Um die Kapazitäten innerhalb einer Periode anzupassen ohne die Kapazitätsstufe zu ändern, modelliert Friese die Möglichkeit eines Arbeitskräfte-Poolings. Hierbei kann die Verlagerung von Mitarbeitern von einer Produktionslinie zur anderen zu einer Kapazitätssteigerung bzw. –minderung führen. Die abgebildeten Kosten beinhalten variable Produktionskosten, Einmal- und Fixkosten für die Installation und den Betrieb von Kapazitätsstufen, Kosten für den Wechsel von Kapazitätsstufen, Transportkosten und Kosten für die Zuordnung von Produkten zu Produktionslinien.

Tonigold erweitert das Modell von Friese um die Abbildung von Lagern hinter jeder Produktionslinie [Ton08]. Dadurch wird eine Verlagerung der Produktion einzelner Produkte in die Vorperiode ermöglicht, was zu variablen Lagerkosten führt. Außerdem betrachtet Tonigold Kosten für die Nicht-Erfüllung der Nachfrage. Er unterteilt die von Friese beschriebenen Kapazitätsstufen in technische und organisatorische Ausbaustufen.

Auch Bihlmaier et al. und Gneiting erweitern das Modell von Friese [BK09], [Gne09]. Bihlmaier et al. präsentieren in ihrer Arbeit ein stochastisches Modell. Gneiting erweitert das Modell wie Tonigold um Strafkosten für nicht erfüllte Nachfrage. Außerdem führt er Produktionskonzepte ein, die den unterschiedlichen Linien zugeordnet werden. Jedes Produktionskonzept verursacht bei seiner Nutzung Einmal- und Fixkosten. Auch die variablen Produktionskosten sind vom genutzten Produktionssystem abhängig. Des Weiteren kann für jedes System festgelegt werden, wie viele Kapazitätsstufen zur Verfügung stehen. Ein einmal gewähltes Produktionssystem kann während des Betrachtungszeitraums nicht mehr gewechselt werden.

Autor	Henrich	Ferber/ Fleischm.	Kau- der	Bund- schuh	Frei- wald	Kriesel
Zuordnung von Produkten zu Linien/ Arbeitssystemen	+	+	+	+	+	+
Netzwerk Betrachtung inkl. Transporte ⁹²	+	+	+	+	+	-
Abbildung von Produktionskonzepten	-	-	-	+	-	+
Abbildung von Kapazitätsstufen	-	+	+	+	+	+
Abbildung einer mehrstufigen Stückliste	-	-	-	+	-	-
Berücksichtigung von Rüstaufwänden	-	-	-	-	-	-
Abbildung der relevanten Kosten	-	+	+	+	+	+

Tabelle 3-1: Bewertung der Ansätze für Auswahl von Produktionskonzepten und Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen (1/2)

Autor	Timm	Friese	Tonigold	Bihlmaier et al.	Gneiting
Zuordnung von Produkten zu Linien/ Arbeitssystemen	+	+	+	+	+
Netzwerk Betrachtung inkl. Transporte ⁹²	-	+	+	+	+
Abbildung von Produktionskonzepten	+	-	-	-	+
Abbildung von Kapazitätsstufen	+	+	+	+	+
Abbildung einer mehrstufigen Stückliste	+	+	+	+	+
Berücksichtigung von Rüstaufwänden	+	-	-	-	-
Abbildung der relevanten Kosten	+	+	+	+	+

Tabelle 3-2: Bewertung der Ansätze für Auswahl von Produktionskonzepten und Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen (2/2)

Alle vorgestellten Modelle und Verfahren eignen sich für die Zuordnung von Produkten zu unterschiedlichen Arbeitssystemen bzw. Linien. Außerdem bilden auch alle Modelle bis auf das Modell von Henrich Kapazitätsstufen ab. Allerdings fehlt bei den Arbeiten von Timm und Kriesel die Abbildung eines Produktionsnetzwerks und damit der Transporte zwischen den Produktionsstandorten. Die Abbildung einer mehrstufigen Stückliste

⁹² Abbildung von variablen Kosten je Kante im Netzwerk; eine genaue Abbildung der Transportkosten ist in keinem der Modelle erfolgt.

findet sich in den Arbeiten von Bundschuh, Timm, Friese, Tonigold, Bihlmaier und Gneiting. Von den Arbeiten eignen sich Ansatz von Gneiting sowie der Ansatz von Bundschuh, Kriesel und Timm für die Abbildung von unterschiedlichen Produktionskonzepten je Arbeitssystem. Dabei stehen bei Gneiting vorgefertigte Produktionskonzepte im Vorfeld der Optimierung zur Verfügung während bei Bundschuh, Kriesel und Timm unterschiedlichste Produktionskonzepte durch die Auswahl unterschiedlicher Fertigungsanlagen erzeugt werden können. Des Weiteren bietet nur das Modell von Timm die Möglichkeit, Kapazitäten von Produktionsanlagen durch Rüstaufwände zu reduzieren.

3.2.2 Make-or-Buy Entscheidung und Auswahl der Zulieferer

Henrich entwickelt in seiner Arbeit ein Modell zur Netzwerkplanung inkl. Make-or-Buy Entscheidung [Hen02]. Hierfür bildet er eine Menge von Zulieferer ab, von denen jeweils unterschiedliche Materialien bezogen werden können. Die Kosten für die Beschaffung setzen sich aus dem Materialpreis und dem Transportkosten vom Lieferanten zu den Produktionsstandorten zusammen⁹³. Henrich schlägt zur Unterstützung der Make-or-Buy Entscheidung vor, die Menge der Zulieferer um interne Zulieferer zu ergänzen. Ferber erweitert die Betrachtung von Henrich um die Betrachtung einer Obergrenze bei der Beschaffung von Materialien [Fer05].

In der Arbeit von Timm wird explizit entschieden, welche Komponenten zugekauft und welche selber produziert werden sollen [Tim09]. Dabei betrachtet er die Produktionskosten inkl. der Einmal- und Betriebskosten für die benötigten Betriebsmittel und die Materialkosten. Timm verzichtet auf die Auswahl von Zulieferern und legt lediglich einen Preis für fremdbeschaffte Produkte fest.

Freiwald bildet ebenfalls eine Menge von Zulieferern für die Beschaffung von Materialien ab [Fre05]. Auch hier können externe und interne Lieferanten abgebildet werden. Die Kosten für den Fremdbezug bestehen aus den variablen Beschaffungskosten. Für jeden Lieferanten kann im Vorfeld Mindest- bzw. Maximalmenge festgelegt werden, die von einem bestimmten Produkt bestellt werden müssen. Diese Begrenzungen gelten dabei nur für Lieferanten, mit denen eine Lieferantenbeziehung eingegangen wird. Außerdem bietet Freiwald die Möglichkeit, die Anzahl der Lieferanten für bestimmte Produkte zu begrenzen.

Obwohl in den Ansätzen von Friese, Tonigold, Bihlmaier und Gneiting Lieferanten nicht explizit abgebildet werden, ist es möglich Produktionsstandorte als Lieferanten zu modellieren [Fri08], [Ton08], [BK09], [Gne09]. Die Kosten für Produktionsstandorte

⁹³ Die Produktionsnetzwerkaspekte des Modells werden in Kapitel 3.2.1 näher beschrieben.

und damit auch für Lieferanten bestehen in allen Modellen aus Einmal-, Fix- und variablen Kosten. Im Gegensatz zu Timm ist es bei dieser Betrachtung der Make-or-Buy Entscheidung auch möglich, eine bestimmte Menge eines Produkts selber zu produzieren und gleichzeitig eine weitere Menge dieses Produkts zuzukaufen.

Kempkes beschreibt in seiner Arbeit ein Modell zur Optimierung der Transportkosten bei der operativen Belieferung [Kem09]. Jede Komponente kann dabei von unterschiedlichen Zulieferern bezogen werden. Mengenrabatte werden als Rabattstufen der Zulieferer abgebildet. Ziel des Modells ist die kostenoptimale Entscheidung, wann welche Produkte von welchem Lieferanten bezogen werden sollen. Dabei werden neben den Einkaufspreisen noch die Kosten für die Anlieferung der Komponenten von den Zulieferern bis an den Verbauort betrachtet. Kempkes stellt sicher, dass vereinbarte Mindest- und Maximalabnahmemengen eingehalten werden.

Reith-Ahlemer beschreibt in ihrer Arbeit ein vom CLSP abgeleitetes Modell zur Zuliefererauswahl [Rei02]. Das $CLSP_{\text{Beschaffung}}$ beinhaltet dabei eine Menge von Produkten und eine Menge von Zulieferern, von denen die Produkte bezogen werden können. In jeder Periode muss entschieden werden, welche Menge jedes Produkts bei welchem Zulieferer bezogen werden soll. Sie bildet dabei Rabattstufen, Mindestbestimmungen und Kapazitätsbeschränkungen je Zulieferer ab. Die nicht sofort benötigten Mengen an Produkten können in Lagern zwischengespeichert werden. Die Zielfunktion des Modells beinhaltet Fixkosten je Lieferant, variable Preise je nach erreichter Rabattstufe und variable Lagerkosten. Transportkosten werden in dem Modell nicht betrachtet.

Autor	Henrich u.a.	Timm	Kempkes	Freiwald	Friese u.a.	Reith-Ahlem.
Make-or-Buy/Zuliefererauswahl	+	○	+	+	+	+
Kapazitäten von Zulieferern	-	-	+	+	+	+
Abbildung von Rabattstufen	-	-	+	-	-	+
Mindestbestimmungen	○	○	+	+	-	+
Begrenzung der Lieferantenzahl	-	-	-	+	-	-
Vertragslaufzeiten	-	-	-	-	-	-
Abbildung der relevanten Kosten	-	-	-	-	+	○

Tabelle 3-3: Bewertung der Ansätze für die Make-or-Buy Entscheidung und die Lieferantenauswahl

Fast alle vorgestellten Modelle ermöglichen eine Make-or-Buy Entscheidung und die damit verbundene Zuliefererauswahl. Lediglich das Modell von Timm beschränkt sich auf die Make-or-Buy Entscheidung ohne die Zulieferer zu betrachten. Kapazitätsrestriktionen für Zulieferer werden in den Modellen von Freiwald, Friese, Kempkes und Reith-Ahlemer abgebildet. Allerdings fehlt im Modell von Friese die Abbildung von Mindestbestimmungen. Bei Timm ist es dagegen nur möglich entweder alle Produkte

zuzukaufen oder alle selber zu produzieren. Während in keinem der Modelle eine Abbildung von Vertragslaufzeiten erfolgt, betrachtet Freiwald die Begrenzung der Lieferantenanzahl für Komponenten. Die betrachteten Kosten beschränken sich bei Henrich, Ferber, Kempkes, Timm und Freiwald auf die variablen Einstandskosten. Reith-Ahlemeier bildet zusätzlich die Fixkosten für eine Lieferantenbeziehung ab. Nur bei der Abbildung von Lieferanten durch Produktionsstandorte bei Friese (u.a.) werden sowohl Einmal-, Fixkosten und variable Kosten als auch Transportkosten betrachtet.

3.2.3 Optimierung des Transportnetzwerks

Die Anforderungen an die Optimierung und Bewertung des Transportnetzwerks lassen zwei unterschiedliche Modellkategorien erkennen. So müssen einerseits alle Waren zwischen den unterschiedlichen Zulieferer-, Produktions- und Kundenknoten des Produktionsnetzwerks transportiert werden. Andererseits muss eine Entscheidung darüber getroffen werden, wo welche Operationen durchgeführt werden. Für die erste Fragestellung werden im Folgenden Netzwerkmodelle auf ihre Eignung überprüft. Die zweite Fragestellung kann mit Hilfe von Maschinenbelegungsplanungsmodellen gelöst werden.

Netzwerkflussmodelle

Das Netzwerk-Design-Modell⁹⁴ optimiert den Transportfluss durch ein gegebenes Netzwerk. Dabei gibt es eine Menge von Knoten, die entweder Quellen, Senken oder Umpackknoten inkl. Lager darstellen, und eine Menge von Kanten, die jeweils zwei Knoten miteinander verbinden. Es müssen die Produkte von den Quellen zu den Senken transportiert werden. Dabei entstehen sowohl Fixkosten für die Nutzung einer Kante als auch variable Transportkosten. Ziel des Modells ist es, die kostenminimale Transportmenge für jede Kante festzulegen. Das kapazitive Netzwerk-Design-Modell⁹⁵ (KNDM) ergänzt noch Kapazitäten auf den Kanten und wird in der Literatur auch „min-cost-flow“- oder Umladeproblem genannt.

Freiwald bildet zwischen Produktionsstandorten und Kunden Lager ab [Fre05]. Alle produzierten Produkte müssen dabei durch ein Lager fließen. Freiwald entscheidet, welches Lager von welchem Produktionsstandort beliefert wird und welche Kunden von diesem Lager ihre Waren beziehen. Das Modell baut auf einem „two-stage, multi-level capacitated facility location problem“⁹⁶ auf. Das Lager kann dabei im Laufe des Betrachtungszeitraums unterschiedliche Lagermodi annehmen, die maximale und minimale Lagermengen je Periode festlegen. Es ist möglich die Anzahl der Lager zu begrenzen

⁹⁴ u.a. beschrieben in [TS07]

⁹⁵ u.a. beschrieben in [FG09]

⁹⁶ u.a. beschrieben in [Kri06]

bzw. eine Mindestanzahl von Lagern festzulegen. Kosten entstehen dabei für die Errichtung und den Betrieb von Lagern in Form von Einmal- und Fixkosten und variable Lager- und Transportkosten. Des Weiteren werden Einmalkosten für den Wechsel von Kapazitätsstufen erhoben.

Kempkes bildet ein Transportnetzwerk zwischen den Zulieferern und den Produktionsstandorten ab [Kem09]. Dabei betrachtet er in seinem Modell sowohl die externe als auch die interne Logistik. Bei der externen Logistik stehen Konsolidierungsknoten zur Verfügung, an denen Warenströme zusammengeführt oder getrennt werden können. Bei der internen Logistik werden Wareneingänge, Lager, Umschlagplätze und Verbauorte betrachtet. Ziel des Modells ist die kostenoptimale Entscheidung über den Kauf⁹⁷ und die Anlieferung der unterschiedlichen Produkte an die Verbauorte. Da das dem Modell zugrunde liegende Problem einen kurzen Zeithorizont betrifft, sind jegliche Lager und Anlagen bereits vorhanden und es werden nur variable Kosten abgebildet, die entweder linear oder sprungfix sind. Beschränkt werden die Entscheidungen durch die Kapazität der Ressourcen. Neben der Auswahl der Transportmenge werden die Art des Ladungsträgers und die Anlieferfrequenz ausgewählt.

Gneiting beschreibt in seiner Arbeit neben dem Modell zur Zuordnung von Produkten zu Arbeitssystemen auch ein Modell zur Logistikplanung [Gne09]. Dabei beschränkt er sich auf die Abbildung von einem möglichen Lager zwischen zwei Produktionsstandorten bzw. zwischen Produktionsstandort und Kunde. Im Gegensatz zu Freiwald ist bei Gneiting jedoch eine Direktbelieferung ohne die Nutzung eines Lagers möglich, weshalb das Modell eher als eine Erweiterung des KNDM angesehen werden kann. Die Kapazitäten auf den Transportkanten sind nicht im Voraus festgelegt, sondern werden über sogenannte Logistikkonzepte im Modell bestimmt. Ein Logistikkonzept kann dabei im Laufe des Betrachtungszeitraums nicht mehr gewechselt sondern nur noch über Kapazitätsstufen angepasst werden. Ziel des Modells ist es, die kostenoptimale Transportmenge auf den Kanten zu bestimmen. Gleichzeitig wird dabei ein Logistikkonzept je Kante gewählt und es werden die Kapazitätsstufen für das Logistikkonzept und die Lager ausgewählt. Gneiting betrachtet dabei Einmal- und Fixkosten für die Installation eines Logistikkonzepts sowie für die Errichtung eines Lagers und variablen Transportkosten.

Maschinenbelegungsplanungsmodelle

Leung et al. haben in ihrer Arbeit ein Modell zur Maschinenbelegungsplanung entwickelt [LT86]. Sie gehen dabei von einer Menge von Maschinen und einer Menge von zu fertigenden Produkten aus. Jedem Produkt ist ein Prozessplan zugeordnet, der angibt, welche Prozesse bzw. Operationen am jeweiligen Produkt durchzuführen sind. Jede

⁹⁷ s. Kapitel 3.2.2

Maschinen kann eine Menge von Operationen an Produkten durchführen. Die unterschiedlichen Maschinen sind durch ein automatisiertes Transportsystem verbunden. Ziel des Modells ist es, die für die jeweiligen Produkte notwendigen Operationen kostenoptimal zu den Maschinen zuzuordnen. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Kapazität der Maschine nicht überschritten wird. Leung et al. betrachten dabei sowohl die Verkaufserlöse durch die Produkte als auch die variablen Kosten für die Durchführung von Operationen und die distanzabhängigen Transportkosten.

Askin et al. verfolgen einen ähnlichen Ansatz [AM92]. Sie integrieren dabei die Auswahl eines Prozessplans für jedes Produkt in ihr Modell. Im Modell werden die verschiedenen Produktionsressourcen und damit auch die unterschiedlichen Operationen Produktionszellen zugeordnet. Sie betrachten die Routenplanung für den Transport der Produkte zu den unterschiedlichen Produktionsressourcen.

Sawik beschäftigt sich in seiner Arbeit mit der Zuordnungen von Operationen zu flexiblen Montagestationen [Saw95]. Diese Montagestationen sind durch ein automatisches Transportsystem verbunden. Ziel ist es, die unterschiedlichen Prozesse bzw. Operationen so auf die Stationen zu verteilen, dass entweder die Arbeitsbelastung ausgeglichen ist, die Anzahl der Stationen minimiert wird oder die Produkttransporte minimiert werden. Sawik betrachtet dabei sowohl die Kapazitäten der Maschinen als auch Vorrangbeziehungen zwischen den Operationen.

Seo et al. versuchen in ihrer Arbeit den Zusammenhang zwischen Materialbearbeitung und Transport abzubilden [SE99]. Ihre Lösungsmethode besteht dabei aus zwei Teilen. Im ersten Teil finden die Auswahl der Maschinen und die Zuordnung der Operationen statt. Im zweiten Teil erfolgt eine Planung der flexiblen Führer, die die automatischen Transportfahrzeuge steuern. Durch die alternierende Lösung der Modelle wird die Produktionszeit minimiert und gleichzeitig versucht die Arbeitsauslastung der Maschinen und die Transportströme möglichst gleichmäßig zu gestalten.

Bockhorst et al. nutzen in ihrer Arbeit die Maschinenbelegungsplanung zur Bewertung neuer Technologien [BSS02]. In ihrem Modell weisen sie in jeder Periode die Produkte und Operationen konventionellen oder neuen Maschinen zu. Dadurch ermitteln sie, welche neuen Maschinen in welcher Periode angeschafft werden sollten. Ziel dabei ist es, den Net Present Value zu minimieren.

Lashkari et al. präsentieren einen Ansatz, der die Materialbelegungsplanung mit der Materialhandhabungsplanung verknüpft [LBP04]. Der Ansatz besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden die unterschiedlichen Operationen den Maschinen oder Maschinengruppen zugeordnet. Im zweiten Schritt werden die Systeme für den die Materialhandhabung an und zwischen den Maschinen ausgewählt und zugeordnet. Dabei werden im ersten Teil des Ansatzes die Kosten für die Durchführung der Operationen, die Rüstkosten und die Materialhandhabungskosten minimiert, während im zweiten Teil ver-

sucht wird, die Kompatibilität der Materialhandhabung mit den unterschiedlichen Produkten zu maximieren. Sujono et al. [SL07] setzen auf der Arbeit von Lashkari et al. auf und integrieren die beiden Einzelschritte in ein Mixed Integer Modell. Dabei sind für jedes Produkt die Charakteristika⁹⁸ und die Nachfrage bekannt. Die notwendigen Materialhandhabungsoperationen für ein Produkt hängen vom gewählten Prozessplan, von der Maschine und der zugeordneten Operation ab. Materialhandhabungssysteme können ein oder mehrere Operationen je nach den Charakteristika der Produkte durchführen.

Autor	KNDM	Freiwald	Kempkes	Gneiting
Festlegung der Transportmengen je Kante	+	+	+	+
Auswahl von Lagerstandorten	+	○	+	○
Auswahl von Speditionen	-	-	+	+
Dimensionierung Lagern und Speditionen	-	○	-	+
Zuordnung von Operationen	-	-	-	-
Auswahl der Anlieferfrequenz	-	-	+	-
Abbildung der relevanten Kosten	○	+	-	+

Tabelle 3-4: Bewertung der Ansätze für die Optimierung des Transportnetzwerks (1/2)

Mit Hilfe aller Netzwerkflussmodelle ist eine Zuordnung der Flussmengen zu den Netzwerkkanten möglich. Jedoch ist bei Freiwald und Gneiting die Anzahl der Knoten zwischen zwei Standorten im externen Unternehmensnetzwerk auf jeweils einen begrenzt. Lediglich in der Formulierung des KNDM und im Modell von Kempkes wird ein Netzwerk beliebiger Größe abgebildet und es kann auch aus mehreren alternativen Lagerstandorten gewählt werden. Die Auswahl aus unterschiedlichen Speditionen steht nur bei Kempkes und Gneiting zur Verfügung. Die Möglichkeit der Dimensionierung von Lagern oder Speditionen wird weder bei Kempkes noch beim KNDP betrachtet. Während Gneiting die Möglichkeit der Kapazitätsanpassung für Speditionen und Lager vorsieht, bietet Freiwald nur die Möglichkeit Lager im Laufe des Betrachtungszeitraums auszubauen. Es zeigt sich, dass keines der Modelle sich zur Zuordnung von Operationen zu Knoten des Netzwerks eignet. Auch stehen nur bei Kempkes unterschiedliche Anlieferfrequenzen zur Auswahl. Da Kempkes Modell für operative Fragestellungen konzipiert wurde, werden in dem Modell nur variable Kosten betrachtet. Das KNDP hingegen bildet zusätzlich Fixkosten für die Nutzung von Netzwerkkanten ab. Lediglich in den Modellen von Freiwald und Gneiting werden neben den variablen Kosten noch Einmal- und Fixkosten für die Errichtung, den Ausbau und den Betrieb von Lagern und bei Gneiting für die Wahl unterschiedlicher Speditionen betrachtet.

⁹⁸ Komplexität, Präzision, Losgröße, Dimension

Autor	Leung et al.	Askin et al.	Sawik	Seo et al.	Bokhorst et al.	Sujono et al.
Festlegung der Transportmengen je Kante	○	○	○	○	○	○
Auswahl von Lagerstandorten	-	○	-	-	○	-
Auswahl von Speditionen	-	-	-	-	-	○
Dimensionierung Lagern und Speditionen	-	-	+	-	+	-
Zuordnung von Operationen	+	+	+	+	+	+
Auswahl der Anlieferfrequenz	-	-	-	-	-	-
Abbildung der relevanten Kosten	○	○	-	-	○	+

Tabelle 3-5: Bewertung der Ansätze für die Optimierung des Transportnetzwerks (2/2)

Alle präsentierten Ansätze aus dem Bereich der Maschinenbelegungsplanung ermöglichen die Zuordnung von Operationen zu stationären Objekte und damit zu Lagern. Allerdings wird in keinem der Modelle der Transport der unterschiedlichen Komponenten ausreichend behandelt. Nur Lashkari et al. und Sujono et al. betrachten den Materialhandhabungsprozess explizit, jedoch nur für das Hauptwerkstück. Außerdem ist bei den meisten Ansätzen keine Auswahl alternativer stationärer Elemente möglich, sondern das Layout ist bereits fest vorgegeben. Nur Bockhorst et al. ermöglichen die Auswahl unterschiedlicher technischer Elemente in einem festgelegten Layout. Askin et al. erlauben nur eine Zuordnung von Maschinen zu fest vorgegebenen Produktionszellen. Außer in dem Modell von Sujono et al. werden in keinem der Ansätze Einmal- und Fixkosten für Anschaffung und Betrieb von Elementen betrachtet. Doch auch Sujono et al. bilden nur Einmalkosten für Maschinen, nicht jedoch für Transport- bzw. Materialhandhabungssysteme ab, die mit Hilfe von variablen Kosten und ihrer Kompatibilität ausgewählt werden.

3.3 Stand der Forschung bei der Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung

Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, ist für die Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung eine Strukturierung der Arbeitssysteme⁹⁹ und eine Austaktung notwendig. Die bestehenden Arbeiten für die Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung werden im Folgenden getrennt nach diesen beiden Aufgaben beschrieben und bewertet.

⁹⁹ die Verteilung einer Menge an Produkten bzw. Produktvarianten auf parallele Fließlinien

3.3.1 Verfahren zur Strukturierung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung

Schmidt beschreibt wie die Arbeitsauslastung von Fließlinien durch die Gruppierung von Arbeitsstationen verbessert werden kann [Sch90]. Den unterschiedlichen Gruppen werden dabei verschiedenen Vormontagen zugeordnet, die von allen Arbeitern der Gruppen durchgeführt werden können. Schmidt zeigt mit Hilfe einer Simulation, dass durch diese Strukturierung Auslastungsverbesserungen erzielt werden können¹⁰⁰. Schmidt beschreibt in seiner Arbeit jedoch nur die Bewertungsmethodik. Ein Verfahren zur Generierung der Gruppen wird nicht angeboten. Auch Kratzsch beschreibt in ihrer Arbeit ein Verfahren zur Bewertung unterschiedlicher Strukturen bei Fließproduktionslinien [Kra00]. Sie stellt hierfür ein mehrstufiges Bewertungssystem vor. Methoden zur Gestaltung von parallelen Fließlinien werden nicht beschrieben.

Gottschalk präsentiert in seiner Arbeit unterschiedliche Verfahren zur Komplexitätsbeherrschung [Got06]. Dabei beschreibt er die Aufteilung der Produkte auf unterschiedliche Kapazitätseinheiten. Die Aufteilung erfolgt sowohl für die unterschiedlichen Varianten als auch für die zu produzierenden Mengen. Eines der von Gottschalk beschriebenen Beispiele umfasst die Strukturierung paralleler Fließlinien. Ziel dabei ist es eine möglichst hohe Flexibilität auf den unterschiedlichen Linien zu erreichen. Dazu werden verschiedene Strukturen mit mehreren Auftragsprogrammen belastet und die entstandenen Fehlmengen bewertet. Dabei weiß Gottschalk nach, dass mit der Aufteilung der Fließlinienfertigung auch eine Verringerung der Belastungsschwankungen einhergeht. Das Kriterium für die Verteilung der Produkte ist die Standardabweichung von der Stationszeit. Allerdings bietet Gottschalk keinen Algorithmus zur Strukturierung der Fließlinien an.

Zeile beschreibt in seiner Arbeit die allgemeine Strukturierung von automatischen Montagesystemen [Zei95]. Dabei teilt er die notwendigen Arbeiten mit Hilfe einer Clusteranalyse auf die unterschiedlichen automatischen Montagestationen. Er betrachtet hierbei unterschiedliche Produktvarianten. Anschließend bestimmt er mit Hilfe der Graphentheorie die Verkettung der Stationen. Dabei bestimmt er neben der Anordnung der Stationen die Art des Flusses und die Höhe der Pufferbestände zwischen den Stationen. Abschließend bewertet er die durch die Algorithmen gefundenen alternativen Strukturen.

Die Clusteranalyse bietet für das vorliegende Teilproblem viele Vorteile. So wird durch das Aufteilen von verschiedenen Varianten eines Produkts auf Cluster eine hohe Homogenität innerhalb eines Clusters erreicht, während die Cluster untereinander heterogen

¹⁰⁰ Allerdings wird dabei deutlich, dass die Verbesserungen sehr stark von der Gruppengröße, von der Zusammensetzung der Gruppen und von der Variantenvielfalt abhängen.

sind. Die Clusteranalyse ist multi-kriteriell und eignet sich daher für die Abbildung vieler Arbeitsplätze einer Fließlinie. So werden Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Varianten über ein Distanzmaß bewertet, das entweder binär oder metrisch ist¹⁰¹. Im Folgenden werden Verfahren vorgestellt, die die Clusteranalyse zur Strukturierung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung verwenden.

Nachtwey et al. beschreiben in ihrem Artikel ein Verfahren zur Clusterung eines gegebenen Produktionsprogramms [NBR07]. Die so gefundenen Teilefamilien sollen auf den gleichen Arbeitssystemen gefertigt werden. Nachtwey et al. gehen dabei jedoch nicht auf vorhandene Ressourcen auf den Fließlinien ein.

Nöth entwickelt einen genetischen Algorithmus zur Strukturierung der Fertigung [Nöt04]. Ziel dabei ist die Optimierung der automobilen Wertschöpfungskette. Dabei kann sowohl eine Teilung entlang der Wertschöpfungskette als auch eine Teilung innerhalb der Wertschöpfungsstufen erfolgen. Ähnlich wie bei Nachtwey et al. wird hierbei nicht auf vorhandene Ressourcen auf den Fließlinien eingegangen.

Gans beschreibt in seiner Arbeit ein Verfahren zur Strukturierung von getakteten Fließlinien [Gan09]. Er beschreibt dabei neben einem mathematischen Modell zur Strukturierung von Arbeitssystemen mit geschlossenen Stationsgrenzen ein Clusterverfahren zur Strukturierung von Arbeitssystemen mit offenen Stationsgrenzen. Dabei verwendet er die euklidische Distanz zwischen den Bearbeitungszeiten aller Arbeitsplätze als Distanzmaß. Bei der Zuteilung der unterschiedlichen Produktvarianten zu den Linien beachtet er außerdem die an den Linien vorhanden Ressourcen und vermeidet dadurch die Erstellung ungültiger Zuordnungen.

Autor	MBP¹⁰²	Schmidt, Kratzsch, Gottschalk	Nachtwey et al.	Nöth	Gans
Strukturierung von Arbeitssystemen	O	-	+	+	+
Bewertung unterschiedlicher Strukturen	O	+	+	+	+
Abbildung von Ressourcen	-	-	-	-	+

Tabelle 3-6: Bewertung der Ansätze für die Strukturierung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung

Die Arbeiten von Schmidt, Kratzsch und Gottschalk hingegen bieten zwar die Möglichkeit unterschiedliche Strukturierungen zu bewerten, zeigen jedoch keine Methode zur Generierung dieser Strukturen auf. Der Algorithmus von Zeile ermöglicht die Strukturierung von Montagesystemen, allerdings entspricht das zugrunde liegende Problem mit

¹⁰¹ Bei binären Distanzmaßen werden mehrere binäre Kriterien miteinander verglichen und je mehr Übereinstimmungen gefunden werden, desto ähnlicher sind sich die Varianten. Die metrische Distanz wird bei quantitativen Kriterien verwendet und es wird die euklidische Distanz zwischen den Kriterien der Varianten berechnet.

¹⁰² Maschinenbelgungsplanung

entkoppelten Stationsgruppen, automatisierten Montagestationen und Puffern zwischen den Gruppen nicht den in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Anforderungen. Die von Nachtwey et al., Nöth und Gans beschriebenen Clusterverfahren können zur Strukturierung von Fertigungssystemen eingesetzt werden, wobei nur Gans die Besonderheiten der Strukturierung von getakteten Fließlinien beachtet.

3.3.2 Austaktung und Simulation der Arbeitssysteme mit Fließlinienfertigung zur Bestimmung der notwendigen Arbeitskräfte

Einer der ersten Ansätze, die sich mit der Austaktung von Fließlinien beschäftigte war Salveson [Sal55]. Er beschreibt in seiner Arbeit ein Modell zur optimalen Verteilung von Arbeitsinhalten auf Stationen. Ziel ist es die Anzahl der notwendigen Arbeitsstationen zu minimieren. Salveson betrachtet in seiner Arbeit jedoch keine unterschiedlichen Varianten sondern ausschließlich die Arbeitsvorgänge für die Herstellung eines Produkts. Je Arbeitsstation gibt es jeweils nur einen Arbeiter und Mehrtakt-Arbeitsplätze werden nicht betrachtet. Merengo et al. betrachten hingegen mehrere Varianten eines Produkts [MNP99]. Neben dem Ziel der Stationsminimierung verfolgen sie das Ziel, die Anzahl nicht fertiggestellter Aufträge zu reduzieren.

Bei Agnetes et al. und Pinnoi et al. ist das Ziel der Austaktung nicht nur eine minimale Stationsanzahl, sondern es wird auch auf eine gleichmäßige Auslastung geachtet [ACL95], [PW97]. Ziel hierbei ist es, die durchschnittliche Auslastung der Arbeitsplätze über alle Stationen möglichst identisch zu gestalten. Schwankungen innerhalb eines Arbeitsplatzes werden in beiden Arbeiten nicht betrachtet. Domschke et al. beschäftigt sich neben der Minimierung der Stationsanzahl ebenfalls mit der Glättung der Arbeitsbelastungen [DKS96]. Im Gegensatz zu Agnetes et al. und Pinnoi et al. betrachten sie hierbei auch die Schwankungen der Arbeitszeiten innerhalb der Arbeitsstationen¹⁰³.

Bock et al. beschreiben in ihrer Arbeit ein Modell zur Neuordnung von Arbeitsvorgängen zu Arbeitsstationen [BRvB06]. Sie gehen dabei von einer bestehenden Fließbandabstimmung aus und passen diese auf Veränderungen im Produktmix an. Hierbei können Arbeitsvorgänge auf bestimmten Arbeitsstationen fixiert werden. Neben dem mathematischen Modell präsentieren Bock et al. einen Lösungsalgorithmus.

Becker et al. beschreiben in ihrer Arbeit ein mathematisches Modell, in dem sie parallele Arbeitsplätze je Station abbilden [BS09a]. Sie betrachten dabei allerdings nur die Austaktung eines Produkts. Neben dem Modell entwickeln sie außerdem einen Branch

¹⁰³ Diese Art der Austaktung wird in der Literatur als „Horizontale Austaktung“ beschrieben während die Anpassung der durchschnittlichen Auslastungen „Vertikale Austaktung“ genannt wird.

& Bound Algorithmus zur Lösung des Problems, mit dem sich kleine Probleme exakt lösen lassen¹⁰⁴. Bestehende Fließbandabstimmungen werden nicht betrachtet.

Gamberini et al. beschreiben ein Vorgehen zur Neuordnung von Arbeitsvorgängen zu Arbeitsplätzen mit stochastischen Prozesszeiten [GGR06]. Sie betrachten hierbei eine Fließlinie mit einem Produkt. Ändert sich eine oder mehrere Prozesszeiten von Arbeitsvorgängen, so wird eine Neuordnung der Arbeitsvorgänge notwendig. Da Gamberini et al. nur ein Produkt betrachten, werden keine Ziele bezüglich der Glättung von Belastungsschwankungen verfolgt.

Boysen et al. präsentieren in ihrer Arbeit ebenfalls einen Ansatz zur Neuordnung von Arbeitsvorgängen zu Arbeitsplätzen [BFS09]. Dabei wählen sie jedoch lediglich eine von mehreren vorher bestimmten Fließbandabstimmungen aus. Dies geschieht im Rahmen einer Produktionsprogrammplanung, bei der die Produktionsmengen für unterschiedliche Perioden festgelegt werden. Sie verwenden dafür einen hierarchischen Algorithmus, bei dem beide Probleme simultan gelöst werden. Allerdings findet sich in der Arbeit keine Beschreibung, wie die unterschiedlichen Fließbandabstimmungen erzeugt wurden.

Altemeier (et al.) stellt ein Verfahren vor, mit dem eine Neuordnung von Arbeitsvorgängen zu Arbeitsstationen ermöglicht wird [Alt09], [AHD10]. Im Gegensatz zu den anderen Arbeiten entwickelt Altemeier ein Entscheidungsunterstützungssystem, das auf die Verwendung eines Vorranggraphen verzichtet. Hierfür entwickelt Altemeier Kennzahlen, die es einem Planer ermöglichen die Stationsanzahl zu minimieren und gleichzeitig die Belastungsschwankungen innerhalb der Arbeitsplätze zu glätten. Das Verfahren ermöglicht einem Planer die Erstellung mehrerer Lösungsalternativen, die dann mit Hilfe einer Fließliniensimulation bewertet werden. Dadurch kann die Anzahl der Springer sowie deren Anzahl an Einsätzen bestimmt werden.

Alle vorgestellten Ansätze eignen sich grundsätzlich zur Austaktung von Fließlinien mit Variantenproduktion. Salvesson und Gamberini et al. beschränken sich dabei jedoch auf die Betrachtung eines Produkts ohne Varianten. Während die meisten der Arbeiten Lösungsmethoden zur Austaktung beschreiben, kann bei Boysen nur aus einer Menge vorher bestimmter Austaktungen gewählt werden. Altemeier (et al.) präsentiert ein Entscheidungsunterstützungssystem, bei dem die Mitarbeit eines Experten erforderlich ist. Dafür kann bei Altemeier im Gegensatz zu den anderen Arbeiten auf die Verwendung eines Vorranggraphen verzichtet werden. Außerdem ist in seinem Verfahren die Betrachtung von Mehrtakter-Arbeitsplätzen möglich, was sonst nur noch bei Becker et al. der Fall ist. Bei allen Arbeiten ist es möglich, die durchschnittliche Auslastung der Arbeitsplätze zu maximieren und damit ihre Anzahl zu minimieren. Nur die Arbeiten von

¹⁰⁴ Durch die Verwendung einer Heuristik eignet sich der Algorithmus auch zur Lösung großer Probleminstanzen.

Agnetes et al., Pinnoi et al., Domschke et al., Boysen et al., und Altemeier (et al.) versuchen zusätzlich die Auslastung der Arbeitsplätze zu nivellieren, wobei sowohl Agnetes et al. als auch Pinnoi et al. dabei nur die durchschnittliche Auslastung der Arbeitsplätze betrachten.

Autor	Salveson	Merengo	Agnetes et al./ Pinnoi et al.	Domschke et al.	Bock et al.
Austaktung von Fließlinien	+	+	+	+	+
Mehrere Varianten abbildbar	-	+	+	+	+
Gegebene Austaktung nutzbar	-	-	-	-	+
Abbildung von Mehrtakt-Arbeitspl.	-	-	-	-	-
Kein Vorranggraph notwendig	-	-	-	-	-
Ziel: Minimierung Arbeitsplätze/ Maximierung Auslastung	+	+	+	+	+
Ziel: Glättung Belastungsschwankungen	-	-	○	+	-
Bewertung der Austaktung	○	○	○	○	○

Tabelle 3-7: Bewertung der Ansätze für die Austaktung und Simulation von Fließlinien (1/2)

Autor	Becker et al.	Gamberini et al.	Boysen et al.	Altemeier (et al.)
Austaktung von Fließlinien	+	+	○	○
Mehrere Varianten abbildbar	+	+	+	+
Gegebene Austaktung nutzbar	-	+	+	+
Abbildung von Mehrtakt-Arbeitspl.	+	-	-	+
Kein Vorranggraph notwendig	-	-	-	+
Ziel: Minimierung Arbeitsplätze/ Maximierung Auslastung	+	+	+	+
Ziel: Glättung Belastungsschwankungen	-	-	+	+
Bewertung der Austaktung	○	○	○	+

Tabelle 3-8: Bewertung der Ansätze für die Austaktung und Simulation von Fließlinien (2/2)

3.4 Stand der Forschung bei der Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik

Die Anforderungen an die Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik sind den Anforderungen an die Planung des Transportnetzwerks sehr ähnlich¹⁰⁵. Aus diesem Grund werden für die Strukturierung und Dimensionierung der in-

¹⁰⁵ Auch hier müssen Komponenten vom Wareneingang durch ein Netzwerk zum Verbauort transportiert werden. Gleichzeitig müssen verschiedene Operationen zu den Lager- und Transportsystemen zugeordnet werden.

ternen Produktionslogistik keine weiteren Arbeiten vorgestellt und das zu entwickelnde Modell wird aus dem Teilmodell zur Transportnetzwerkplanung abgeleitet werden.

4 Zu leistende Arbeit

Wie in Kapitel 3.1 gezeigt wurde, entspricht keines der untersuchten Bewertungsverfahren für Gleichteilestrategien den in Kapitel 2.3 beschriebenen Anforderungen. Daraus lässt sich der Forschungsbedarf für die Entwicklung eines Planungsmodells zur Bewertung der Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik für unterschiedliche Gleichteilestrategien ableiten. Im Folgenden werden die für die drei Teilverfahren untersuchten Arbeiten aus Kapitel 3.2 - 3.4 identifiziert, die für die Lösung des Planungsmodells genutzt werden können, und es wird die noch zu leistende Arbeit abgeleitet.

4.1 Erstellung von Planungsmodellen und –verfahren

Zur Erstellung eines Modells zur Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks müssen unterschiedliche bestehende Modelle miteinander verknüpft werden. Im Bereich der Produktionsnetzwerkplanung erfüllt das Modell von Gneiting [Gne09] die meisten der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Anforderungen. Dieses Modell muss um die Betrachtung von Rüstaufwänden erweitert werden. Des Weiteren ist eine Zusammenfassung der organisatorischen und technischen Ausbaustufen sinnvoll. Das Modell von Reith-Ahlemeier [Rei02] eignet sich für die Make-or-Buy Entscheidung und die Auswahl der Zulieferer. Da das Modell weder eine Begrenzung der Lieferantenzahl je Produkt noch minimale bzw. maximale Vertragslaufzeiten abbildet, sind diese Aspekte in das Modell zu integrieren. Des Weiteren ist eine Erweiterung der Kosten um Einmalkosten für die Aufnahme einer Lieferantenbeziehung notwendig. Für eine exakte Abbildung des Transportnetzwerks und der damit verbundenen Transportkosten müssen die Netzwerkflussmodelle mit den Modellen der Maschinenbelegungsplanung verknüpft werden. Aus dem Bereich der Netzwerkflussmodelle sind dazu das kapazitive Netzwerk Design Modell [FG09] und das Logistikmodell von Gneiting [Gne09] zu einem Modell zu integrieren und um die Abbildung von Anlieferfrequenzen zur Bestimmung des Lager- und Transportkapazitätsbedarfs zu erweitern. Das so entstandene Modell ist um die Operationszuordnungsaspekte des Modells von Sujono et al. [SL07] zu ergänzen.

Für die Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung ist ein Verfahren zur Strukturierung von Arbeitssystemen mit getakteten Fließlinien und ein Verfahren Austaktung und Simulation der Arbeitssysteme zu integrieren. In Kapitel 3.3.1 zeigt sich, dass das Verfahren von Gans [Gan09] alle Anforderungen der Problem-

stellung erfüllt. Weiterhin ist das Verfahren von Altemeier [Alt09], [AHD10] zu verwenden, welches ohne einen Vorranggraphen genutzt werden kann und die Ermittlung der Springeranzahl sowie deren Anzahl an Einsätzen ermöglicht.

Das Modell zur Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik wird aus dem Teilmodell zur Transportnetzwerkplanung abgeleitet. Allerdings wird dabei auf die Abbildung von Anlieferfrequenzen verzichtet. Das Modell ist außerdem um die Abbildung und Auswahl unterschiedlicher Transportsystem inkl. Routen zu erweitern. Die Transportsysteme und Routen ersetzen damit die Speditionen im Transportnetzwerkmodell. Außerdem müssen Restriktionen hinzugefügt werden, die sicherstellen, dass exklusive Operationen genau einem System zugeordnet werden. Operationen können in diesem Teil des Bewertungsverfahrens auch Transportsystemen zugewiesen werden. Hierfür sind entsprechende Kapazitäten für die Transportsysteme zu modellieren.

4.2 Erstellung eines hierarchischen Vorgehens

Die verschiedenen Modelle und Verfahren sind in ein hierarchisches Vorgehen zu integrieren. Dabei ist ein Top-Down Verfahren zu entwickeln, bei dem die Ergebnisse der übergeordneten Modelle bzw. Verfahren so aufbereitet werden, dass sie als Eingabedaten in den untergeordneten Modellen bzw. Verfahren eingesetzt werden können. Nach der Lösung der Modelle bzw. der Verfahren sind die durch die getroffenen Entscheidungen fixierten Kosten zu berechnen und nach der Lösung aller Modelle und Verfahren zu den Gesamtkosten der jeweiligen Gleichteilestrategie zu addieren. Neben dem Top-Down Verfahren sind Rückkopplungen zu bestimmen, die Annahmen aus den oberen Hierarchieebenen korrigieren. Hierfür müssen Berechnungsvorschriften definiert werden, um die berechneten Kosten der unteren Hierarchiestufe zu Kosten der oberen Hierarchiestufe zu aggregieren.

5 Hierarchisches Planungsmodell zur Bestimmung der Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik bei unterschiedlichen Gleichteilestrategien

5.1 Beschreibung der Modelle und Verfahren

5.1.1 Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks

Das mathematische Modell zur Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks wird entsprechend der unterschiedlichen Planungsaufgaben in vier Teilmodelle zerlegt, die in das in Kapitel 5.2 beschriebene hierarchische Vorgehen integriert werden. Dadurch werden deutlich kürzere Laufzeiten bei der Optimierung des Planungsproblems ermöglicht. Außerdem kann je nach Aufgabenstellung auf die Lösung einzelner Teilprobleme verzichtet und damit der Bewertungsaufwand reduziert werden¹⁰⁶. Für kleine und wenig komplexe Problemstellungen oder bei der Verwendung einer ausreichenden IT-Infrastruktur lassen sich die vier Teilmodelle relativ einfach in ein gemeinsames Modell integrieren und damit simultan lösen.

Im ersten Modell wird entschieden, welche Komponenten zugekauft und welche selber hergestellt werden. Des Weiteren werden die Zulieferer ausgewählt, von denen die unterschiedlichen Komponenten beschafft werden sollen und es wird entschieden, ob Rahmenverträge mit diesen Zulieferern abgeschlossen werden sollten. Im zweiten Modell werden Produktionskonzepte ausgewählt und den unterschiedlichen Arbeitssystemen zugeordnet. Außerdem werden die zu produzierenden Outputfaktoren den Arbeitssystemen zugeordnet. Mit Hilfe des dritten Modells wird die Infrastruktur des Transportnetzwerks geplant. Dabei werden Zwischenlager zwischen Zulieferer und Produktionswerk bzw. zwischen den Produktionsstandorten ausgewählt und dimensioniert. Im vierten und letzten Modell wird entschieden, ob externe Speditionen den Transport der Komponenten übernehmen und ob langfristige Verträge mit diesen Speditionen abgeschlossen oder ob eigene Transportmittel beschafft werden sollten. Im Folgenden werden die vier Modelle vorgestellt. In Kapitel 5.2 wird dann das hierarchische Vorgehen zur Lösung der Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Lo-

¹⁰⁶ So kann beispielsweise bei kleineren Unternehmen mit nur einem Produktionsstandort auf die Zuordnung der Produkte zu den Produktionsstandorten verzichtet werden.

gistiknetzwerks im Rahmen des Gesamtverfahrens zur Bewertung unterschiedlicher Gleichteilestrategien erläutert.

5.1.1.1 Modell für die Make-or-Buy Entscheidung und die Auswahl der Zulieferer

Ziel dieses Modells ist die kostenoptimale Auswahl von Zulieferern und die Bestimmung der jeweiligen Bestellmengen. Die Modellierung erlaubt dabei die Abbildung interner und externer Lieferanten. Besteht bei einem externen Lieferanten die Auswahl zwischen unterschiedlich ausgestalteten Verträgen, so kann dies durch mehrere Lieferanten abgebildet werden.

Zielfunktion

$$\min \sum_t q_t \cdot \left[\sum_{i,z,s,d} c_{izd}^{Var-I-Z} \cdot X_{izsdt}^{Transp-Z} + \sum_{zt} (c_z^{EK-Z} \cdot Y_{zt}^{Z-Neu} + c_z^{Fix-Z} \cdot Y_{zt}^Z) + \sum_{i,z,s,d} X_{izsdt}^{Transp-Z} \cdot c_{izs}^{Transp-Z} \right] \quad (5-1)$$

Die Zielfunktion besteht aus der Summe der zu zahlenden Preise, den Einmal- und Fixkosten, sowie den Transportkosten. Der Preis der zu beschaffenden Komponenten ist von der erreichten Rabattstufe des Zulieferers abhängig. Die Transportkosten zwischen Zulieferer und Produktionsstandort werden hier nur grob abgeschätzt und in Kapitel 5.1.1.3 und 5.1.1.4 genau bestimmt. Die Kosten werden auf die erste Periode abgezinst.

Nebenbedingungen

Durch Restriktion (5-2) wird sichergestellt dass die minimale und maximale Anzahl von Zulieferern je Komponente eingehalten wird.

$$k_i^{AnzZ-Min} \leq \sum_z Y_{izt}^{Z-I} \leq k_i^{AnzZ-Max} \quad \forall i, t \quad (5-2)$$

Durch (5-3) wird gewährleistet, dass eine vertraglich vereinbarte Mindestabnahmemenge nicht unterschritten wird. Außerdem wird verhindert, dass die Kapazität der Zulieferer je Produkt überschritten wird.

$$Y_{izt}^{Z-I} \cdot k_{iz}^{Best-Min} \leq \sum_{s,d} X_{izsdt}^{Transp-Z} \leq Y_{izt}^{Z-I} \cdot k_{iz}^{Best-Max} \quad \forall i, z, t \quad (5-3)$$

Bei internen Lieferanten wird sichergestellt, dass die Gesamtkapazität ausreicht, um alle zugeordneten Produkte fertigen zu können (5-4).

$$\sum_{i,s,d} X_{izsdt}^{Transp-Z} \leq k_z^Z \quad \forall z \in Z^{Intern}, t \quad (5-4)$$

Sollten minimale bzw. maximale Vertragslaufzeiten in den Rahmenverträgen vereinbart worden sein, so sorgt Restriktion (5-5) dafür, dass diese auch eingehalten werden.

$$\sum_t Y_{izt}^{Z-I-Neu} \cdot t_{iz}^{LZZ-Min} \leq \sum_t Y_{izt}^{Z-I} \leq \sum_t Y_{izt}^{Z-I-Neu} \cdot t_{iz}^{LZZ-Max} \quad \forall z \quad (5-5)$$

In (5-6) werden die Variablen gesetzt, die die Information enthalten, wann eine Beziehung mit einem Lieferanten erstmals zustande gekommen ist. Eine Lieferantenbeziehung kann im Planungszeitraum je Komponente nur einmal eingegangen werden (5-7).

$$Y_{izt}^{Z-I} - Y_{izt-1}^{Z-I} \leq Y_{izt}^{Z-I-Neu} \quad \forall i, z, t \quad (5-6)$$

$$\sum_t Y_{izt}^{Z-I-Neu} \leq 1 \quad \forall i, z \quad (5-7)$$

Um die Rabattstufe eines Zulieferers in Anspruch nehmen zu können, muss eine bestimmte Mindestabnahmemenge bei diesem Lieferanten bestellt werden (5-8). In (5-9) wird sichergestellt, dass nur maximal eine Rabattstufe je Periode bei einem Zulieferer in Anspruch genommen wird.

$$Y_{izdt}^{Z-D} \cdot k_{izd}^{D-Min} \leq \sum_s X_{izsdt}^{Transp-Z} \leq Y_{izdt}^{Z-D} \cdot bigM \quad \forall t, i, z, d \quad (5-8)$$

$$\sum_d Y_{izdt}^{Z-D} \leq 1 \quad \forall i, z, t \quad (5-9)$$

Restriktion (5-10) gewährleistet, dass der Bedarf an Komponenten in den verschiedenen Produktionsstätten erfüllt wird.

$$\sum_{z,d} X_{izsdt}^{Transp-Z} = d_{ist}^{NF-S} \quad \forall i, s, t \quad (5-10)$$

In den letzten beiden Restriktionen werden die Variablen für die Berechnung der Einmal- und der Fixkosten gesetzt.

$$\sum_i Y_{izt}^{Z-I} \leq Y_{zt}^Z \cdot bigM \quad \forall z, t \quad (5-11)$$

$$Y_{zt}^Z - Y_{zt-1}^Z \leq Y_{zt}^{Z-Neu} \quad \forall z, t \quad (5-12)$$

5.1.1.2 Modell zur Auswahl der Produktionskonzepte und zur Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen

Ziel dieses Modells ist die kostenoptimale Auswahl an Produktionskonzepten und die Zuordnung der Produktionsmengen zu den unterschiedlichen Arbeitssystemen. Dabei wird entschieden, welche Kapazitätsstufe in welcher Periode für die unterschiedlichen Produktionssysteme gewählt wird. Um eine gültige Lösung bei unzureichenden Produk-

tionskapazitäten zu erhalten ist eine Unterdeckung der Nachfrage bei sehr hohen Kosten zulässig.

Zielfunktion

Zur besseren Übersichtlichkeit sind die einzelnen Bestandteile der Zielfunktion einzeln beschrieben und werden anschließend zur Gesamtzielfunktion zusammengeführt.

$$SK_t = \sum_{i,m} c_{im}^{SK} \cdot X_{imt}^{SK} \quad (5-13)$$

$$VK_t = \sum_{i,l,p,n} c_{ilpn}^{Var-I-P} \cdot X_{ilpnt}^{ProdD} \quad (5-14)$$

$$TK_t = \sum_{i,l,\hat{l}} c_{i\hat{l}}^{Transp-P} \cdot X_{i\hat{l}t}^{Transp-P} + \sum_{i,l,m} X_{ilm}^{Transp-M} \cdot c_{ilm}^{Transp-M} \quad (5-15)$$

$$WK_t = \sum_{l,p,n,\hat{n}} c_{lpn\hat{n}}^{KW-P} \cdot Y_{lpn\hat{n}}^{P-L-KW} \quad (5-16)$$

$$PZK_t = \sum_{i,l,p} c_{ilp}^{EK-I-P} \cdot Y_{ilpt}^{P-KW} \quad (5-17)$$

$$PKK_t = \sum_{l,p,n} c_{lpn}^{Fix-P} \cdot Y_{lpnt}^{P-L} \quad (5-18)$$

Im ersten Teil der Zielfunktion werden die Strafkosten für eine nicht erfüllte Nachfrage ermittelt. Die Strafmen gen und die dazugehörigen Strafkosten dienen hier nur zur Vermeidung einer ungültigen Lösung, falls nicht genügend Kapazitäten im Produktionsnetzwerk vorhanden sind. Die Strafkosten sollten daher sehr hoch angesetzt werden. In Formel (5-14) werden die variablen Produktionskosten in den Arbeitssystemen je Periode berechnet. Mit Hilfe von Formel (5-15) werden die Transportkosten je Periode bestimmt. Der erste Teil dient der Berechnung der Transport zwischen den Arbeitssystemen während im zweiten Teil die Transportkosten zu den Märkten ermittelt werden. In den Formeln (5-16) und (5-17) werden die Einmalkosten bestimmt, die je Periode anfallen. (5-16) gibt dabei die Kosten an, die durch die Installation eines bestimmten Produktionskonzepts in einer bestimmten Kapazitätsstufe anfallen, während in (5-17) die produktspezifischen Einmalkosten berechnet werden, die anfallen, wenn die Zuordnung eines Produkts zu einem Produktionskonzept zusätzliche Einmalkosten erforderlich. Abschließend werden in (5-18) die verbrauchsunabhängigen berechnet. Ziel ist die Minimierung der auf die erste Periode abgezinsten Summe der Kosten.

$$\min NPV = \sum_t q_t [SK_t + VK_t + TK_t + WK_t + PZK_t + PKK_t] \quad (5-19)$$

Nebenbedingungen

In Restriktion (5-20) wird sichergestellt, dass die Nachfrage nach jedem Produkt auf jedem Absatzmarkt entweder durch Transporte zu diesem Markt oder durch die Fehlmengevariable X^{SF} gedeckt wird.

$$\sum_l X_{ilmt}^{Transp-M} + X_{imt}^{SK} = d_{imt}^{NF-M} \quad \forall i, m, t > 0 \quad (5-20)$$

Durch Restriktion (5-21) wird die Erzeugnisstruktur abgebildet. Soll ein Produkt \hat{i} produziert werden, so müssen alle notwendigen Vorprodukte i in ausreichender Menge angeliefert werden.

$$\sum_l X_{i\hat{i}l}^{Trans-P} = d_{ii}^{BOM} \cdot X_{\hat{i}l}^{Prod} \quad \forall i, \hat{i}, l, t > 0 \quad (5-21)$$

Produzierte Produkte müssen entweder zum weiteren Verbau zu weiteren Arbeitssystemen oder, im Fall von Endprodukten, zu den Absatzmärkten transportiert werden. Ein Verbleib der Produkte ist aufgrund des langfristigen Planungszeitraums und den damit verbundenen großen Planungsperioden nicht vorgesehen (5-22).

$$X_{ilt}^{Prod} = \sum_{\hat{i}, \hat{l}} X_{i\hat{i}\hat{l}t}^{Trans-P} + \sum_m X_{ilmt}^{Transp-M} \quad \forall i, l, t > 0 \quad (5-22)$$

Gleichung (5-23) stellt den Zusammenhang zwischen den beiden Produktionsmengenvariablen her. Dabei gibt X^{ProdD} im Gegensatz zu X^{Prod} zusätzlich an, in welchem Produktionskonzept mit welcher Kapazitätsstufe gefertigt wird.

$$X_{ilt}^{Prod} = \sum_{p,n} X_{ilpnt}^{ProdD} \quad \forall i, l, t \quad (5-23)$$

Wird ein Produkt gefertigt, so muss es auch dem entsprechenden Arbeitssystem und dem entsprechenden Produktionskonzept zugeordnet sein (5-24).

$$\sum_n X_{ilpnt}^{ProdD} \leq bigM \cdot Y_{ilpt}^P \quad \forall i, l, p, t \quad (5-24)$$

Die initiale Belegung eines Arbeitssystems mit einem Produktionskonzept und den bereits produzierbaren Produkten zu Beginn des Planungszeitraums wird in Gleichung (5-25) übergeben.

$$Y_{ilpt}^P = z_{ilp}^{Init-L} \quad \forall i, l, p, t = 0 \quad (5-25)$$

Wird in einem Arbeitssystem in einer Periode ein Produkt erstmals einem Arbeitssystem zugeordnet, so wird die entsprechende Wechselvariable in dieser Periode durch Gleichung (5-26) aktiviert.

$$Y_{ilpt}^P - Y_{ilp(t-1)}^P \leq Y_{ilpt}^{P-KW} \quad \forall i, l, p, t > 0 \quad (5-26)$$

In Gleichung (5-27) wird sichergestellt, dass die vorhandene Kapazität eines Produktionskonzepts nicht überschritten wird. Die Kapazität muss dabei ausreichen um alle ihr zugeordneten Produkte je Periode zu produzieren. Gleichzeitig wird die Kapazität durch

die notwendigen Rüst- und Losanlaufverluste je zugeordneter Komponente reduziert. Außerdem wird die Belegungsvariable für das Produktionskonzept mit der dazugehörigen Kapazitätsstufe und dem dazugehörigen Schichtmodell aktiviert.

$$\sum_i (k_{ilp}^{Bed-P} \cdot X_{ilpnt}^{Prod} + Y_{ilpt}^P \cdot k_{ilp}^{RLV}) \leq k_{lpn}^P \cdot Y_{lpnt}^{P-L} \quad \forall l, p, n, t \quad (5-27)$$

Ist für ein Arbeitssystem bereits ein Produktionskonzept in einer Kapazitätsstufe zugeordnet, so wird die entsprechende Belegungsvariable aktiviert (5-28).

$$Y_{lpnt}^{P-L} = z_{lpn}^{Init-P} \quad \forall l \in L^{Init}, p, n, t = 0 \quad (5-28)$$

Für alle übrigen Arbeitssysteme müssen die Belegungsvariablen in Periode 0 für ein Produktionskonzept auf die inaktive Kapazitätsstufe $n = 0$ gesetzt werden. So wird gewährleistet, dass die Einmalkosten für die Installation des Produktionskonzepts korrekt in die Zielfunktion einfließen.

$$\sum_p Y_{lpnt}^{P-L} = 1 \quad \forall l \notin L^{Init}, n = 0, t = 0 \quad (5-29)$$

Mit der Gleichung (5-30) wird gewährleistet, dass je Arbeitssystem in jeder Periode maximal ein Produktionskonzept mit einer Kapazitätsstufe aktiv ist.

$$\sum_{p,n} Y_{lpnt}^{P-L} = 1 \quad \forall l, t \quad (5-30)$$

Des Weiteren sorgt Gleichung (5-31) dafür, dass ein einmal gewähltes Produktionskonzept über den kompletten Produktionszeitraum beibehalten wird.

$$\sum_n Y_{lpnt}^{P-L} = \sum_n Y_{lpn(t-1)}^{P-L} \quad \forall l, p, t > 0 \quad (5-31)$$

Bei einem Wechsel der Kapazitätsstufe bzw. des Schichtmodells wird die entsprechende Wechselvariable durch (5-32) aktiviert.

$$Y_{lp\hat{n}t}^{P-L} + Y_{lpn(t-1)}^{P-L} \leq 1 + Y_{lpn\hat{n}t}^{P-L-KW} \quad \forall l, p, n, \hat{n}, t > 0 \quad (5-32)$$

5.1.1.3 Modell zur Lagerauswahl und –dimensionierung, zur Zuordnung von Operationen und zur Festlegung der Flussmengen

Ziel dieses Modells ist die Auswahl und Dimensionierung von Zwischenlagern. Neben der Auswahl der Lager wird entschieden, wo mögliche fremdzuvergebende Operationen durchgeführt werden. Unterschiedliche Ausgestaltungen von Lagern an einem Standort können über verschiedene Lager abgebildet werden, die nicht gemeinsam aktiviert werden dürfen.

Zielfunktion

$$KBK_t = \sum_{i,j} \left(\sum_{v,a} \frac{X_{ivjat}^{Transp-J}}{2 \cdot d_a^{AnzL}} \cdot c_i^{KBK} \cdot z_j^{J-KBK} + \sum_s X_{ijst}^{SB} \cdot c_i^{KBK} \right) \quad (5-33)$$

$$LK_t = \sum_{i,j,v,a} X_{ivjat}^{Transp-J} \cdot c_{ij}^{Var-I-J} + \sum_{j,n} \left(\sum_{\hat{n}>n} Y_{jn\hat{n}t}^{J-KW} \cdot c_{jn\hat{n}}^{KW-J} + Y_{jnt}^{J-N} \cdot c_{jn}^{Fix-J} \right) \quad (5-34)$$

$$OK_t = \sum_{i,j,s,0} X_{ijost}^{J-I-O-S} \cdot c_{ijo}^{Var-O-J} + \sum_{j,0} (Y_{jot}^{J-O-Neu} \cdot c_{jo}^{EK-J-O} + Y_{jot}^{J-O} \cdot c_{jo}^{Fix-J-O}) \quad (5-35)$$

$$TK_t = \sum_{i,v,\hat{v},a} X_{iv\hat{v}at}^{Transp-J} \cdot c_{iv\hat{v}a}^{Transp-J} \quad (5-36)$$

Für die optimale Planung der Lager müssen die Kapitalbindungskosten, Kosten für die Errichtung und den Betrieb der Lager, die Kosten für zusätzliche Operationen und die Transportkosten betrachtet werden. Kapitalbindungskosten fallen für den durchschnittlichen Lagerbestand und den Sicherheitsbestand an (5-33). Für den Lagerbestand wird angenommen, dass sich jedes Produkt die Hälfte der Zeitspanne zwischen zwei Lieferungen im Lager befindet, bevor es weitertransportiert wird. Damit ergibt sich ein durchschnittlicher Lagerbestand von der halben Liefermenge. Für die produktionsnahen Lager wird ein kontinuierlicher Verbrauch der Komponenten angenommen, was ebenfalls zu einem durchschnittlichen Lagerbestand von der halben Liefermenge führt. Die Kosten für die Lager setzen sich aus Einmalkosten, den Fixkosten und den variablen Kosten zusammen (5-34). Einmalkosten fallen für jeden Wechsel der Kapazitätsstufe eines Lagers an. Zu Beginn des Betrachtungszeitraums befindet sich jedes Lager in der Kapazitätsstufe 0 und ist damit inaktiv. Somit stellt ein Wechsel der Kapazitätsstufe von 0 auf n eine Eröffnung eines Lagers dar. Für Operationen fallen Einmal-, Fix- und variablen Kosten an (5-35). Die variablen Transportkosten auf den Kanten des Netzwerks werden lediglich abgeschätzt und im nachfolgenden Modell genauer bestimmt (5-36). Ziel ist die Minimierung der Summe der beschriebenen Kosten, abgezinst auf die erste Periode (5-37).

$$\min \sum_t q_t \cdot [KBK_t + LK_t + OK_t + TK_t] \quad (5-37)$$

Nebenbedingungen

Restriktion (5-38) gewährleistet die Einhaltung der Kapazität der Lager. Hierbei muss die Kapazität eines Lagers größer sein als die darin gelagerten Sicherheitsbestände und die Summe aller temporär gelagerten Komponenten. Da jedoch bei einem langfristigen Betrachtungshorizont nicht bekannt ist welche Komponenten gleichzeitig im Lager sind, wird angenommen, dass alle Lieferungen zu einem Lager gleichzeitig stattfinden. Diese Abschätzung kann durch den Anwender mit Hilfe eines Korrekturfaktors erhöht bzw. reduziert werden.

$$\sum_{i,v,a} k_i^{Bed-l} \cdot \frac{X_{ivjat}^{Transp-J}}{d_a^{AnzL}} \cdot u_j^{Kapa} + \sum_{i,s} X_{ijst}^{SB} \cdot k_i^{Bed-l} \leq \sum_n k_{jn}^{J-N} \cdot Y_{jnt}^{J-N} \quad \forall j, t \quad (5-38)$$

Restriktion (5-39) sorgt dafür, dass für ein Lager je Periode genau eine Kapazitätsstufe gewählt wird.

$$\sum_n Y_{jnt}^{J-N} = 1 \quad \forall j, t \quad (5-39)$$

In (5-40) wird die Kapazitätswechselvariable gesetzt, sollte die Kapazitätsstufe eines Lagers in der Vorperiode niedriger sein als in der aktuell betrachteten.

$$Y_{jnt}^{J-N} + Y_{jnt-1}^{J-N} \leq 1 + Y_{j\hat{n}t}^{J-KW} \quad \forall j, t, n, \hat{n} > n \quad (5-40)$$

In Restriktion (5-41) wird der Sicherheitsbestand einem Lager zugewiesen. Er muss dabei immer in dem Lager vorgehalten werden, das direkt zum Verbauort der Komponente liefert (5-42).

$$X_{ijst}^{SB} = d_{is}^{SB} \cdot Y_{ijst}^{SB} \quad \forall i, j, s, t \quad (5-41)$$

$$Y_{ijst}^{SB} = \sum_a Y_{ijsat}^{Transp-J} \quad \forall t, i, j, s \quad (5-42)$$

In den Restriktionen (5-43) wird die Transportmenge vom letzten Lager zum Verbauort auf den Bedarf der entsprechenden Komponente gesetzt. Dabei muss gewährleistet werden, dass die Belieferung eines Standorts von einem Lager erfolgt (5-44).

$$X_{ijsat}^{Transp-J} = d_{ist}^{NF-S} \cdot Y_{ijsat}^{Transp-J} \quad \forall i, j, s, a, t \quad (5-43)$$

$$\sum_{j,a} Y_{ijsat}^{Transp-J} \leq 1 \quad \forall i, s, t \quad (5-44)$$

In (5-45) werden die Transporte vom Zulieferer zu den Lagern so eingestellt, dass die abtransportierte Menge der Menge an gekauften Komponenten bei dem entsprechenden Zulieferer entspricht.

$$\sum_{a,j} X_{izjat}^{Transp-J} = d_{izt}^{I-Z} \quad \forall i, z, t \quad (5-45)$$

Die Restriktion (5-46) sorgt dafür, dass die Menge an Komponenten, die in ein Lager hineinfließen dieses auch wieder verlassen.

$$\sum_{v,a} X_{ivjat}^{Transp-J} - \sum_{v,a} X_{ijvat}^{Transp-J} = 0 \quad \forall i, j, t \quad (5-46)$$

In den Restriktionen (5-47) und (5-48) wird gewährleistet, dass je Kante im Netzwerk nur maximal eine Transportfrequenz aktiviert wird.

$$X_{iv\hat{v}at}^{Transp-J} \leq bigM \cdot Y_{iv\hat{v}at}^{Transp-J} \quad \forall i, v, \hat{v}, t, a \quad (5-47)$$

$$\sum_a Y_{iv\hat{v}at}^{Transp-J} \leq 1 \quad \forall i, v, \hat{v}, t \quad (5-48)$$

Durch die Restriktionen (5-49) und (5-50) werden die zusätzlichen Operationen zugeordnet. Dabei wird zwischen Operationen unterschieden, die fabriknah erfolgen müssen und daher im letzten Lager vor dem Verbau zuzuordnen sind (5-49) und solchen, die jedem beliebigen Lager zugewiesen werden können (5-50).

$$X_{ijost}^{J-I-O-S} = \sum_a Y_{ijsat}^{Transp-J} \cdot d_{iost}^{OB} \quad \forall i, s, j, t, o \in O^{Fabriknah} \quad (5-49)$$

$$\sum_j X_{ijost}^{J-I-O-S} = d_{iost}^{OB} \quad \forall i, s, t, o \in O^{Fabrikfern} \quad (5-50)$$

Restriktion (5-51) stellt sicher, dass die Kapazität des Lagers für die Durchführung von Operationen nicht überschritten wird. Wird eine Operation einem Lager neu zugewiesen, so muss die entsprechende Aktivierungsvariable gesetzt werden (5-52).

$$\sum_{i,s} X_{ijost}^{J-I-O-S} \leq \sum_n k_{jo}^{J-O} \cdot Y_{jot}^{J-O} \quad \forall j, o, t \quad (5-51)$$

$$Y_{jot}^{J-O} - Y_{jost-1}^{J-O} \leq Y_{jot}^{J-O-Neu} \quad \forall j, o, t \quad (5-52)$$

In den letzten beiden Restriktionen wird sichergestellt, dass nur maximal ein Lager aus einer Menge alternativer Lager gewählt wird. Hierfür muss zuerst eine Variable gesetzt werden, die aussagt, ob ein Lager im gesamten Planungszeitraum mindestens eine Periode genutzt wird (5-53). Anschließend wird die gleichzeitige Nutzung ausgeschlossen (5-54).

$$\sum_{t,n} Y_{jnt}^{J-N} \leq Y_j^J \cdot bigM \quad \forall j \quad (5-53)$$

$$Y_j^J + \sum_{j \in J_j^{Zus}} Y_j^J \leq 1 \quad \forall j \quad (5-54)$$

5.1.1.4 Modell zur Speditionsauswahl

Im zweiten Modell zur Planung der externen Logistik erfolgt die Auswahl der Speditionen. Hierbei wird zwischen eigenen Fuhrparks und externen Logistikdienstleistern unterschieden. Wird ein eigener Fuhrpark für den Transport gewählt, so muss die Anzahl

der zu kaufenden Transportmittel in den einzelnen Perioden bestimmt werden. Bei externen Logistikdienstleistern kann zwischen unterschiedlichen Kapazitätsstufen gewählt werden. Stehen bei einem Spediteur mehrere Transportmittel zur Auswahl, so werden hierfür mehrere Spediteure erstellt.

Zielfunktion

$$VK_t = \sum_{i,v,\hat{v},\tau,a} X_{i\hat{v}\tau a}^{Transp-T} \cdot \left(c_{i\hat{v}\tau a}^{Transp-T} + c_i^{KBK} \cdot \left(\frac{1}{d_a^{AnzL} \cdot 2} + \frac{t_{\tau\hat{v}}^{Transp}}{t_{Periode}} \right) \right) \quad (5-55)$$

$$TK_t^{Eigen} = \sum_{\tau \in T^{Eigen}} (c_{\tau}^{EK-TM} \cdot X_{\tau t}^{TM-Neu} + X_{\tau t}^{TM} \cdot c_{\tau}^{Fix-TM}) \quad (5-56)$$

$$TK_t^{Fremd} = \sum_{\tau \notin T^{Eigen}, n} \left(c_{\tau n}^{Fix-T} \cdot Y_{\tau n t}^{T-N} + \sum_{\hat{n}} Y_{\tau n \hat{n} t}^{T-KW} \cdot c_{\tau n \hat{n}}^{KW-T} \right) \quad (5-57)$$

Die Zielfunktion zur Auswahl der Speditionen besteht aus Einmal- und Fixkosten für die eigene (5-56) und für externe (5-57) Speditionen, und den variablen Kosten (5-55). Die variablen Kosten bestehen aus den variablen Transportkosten, die je nach Spediteur und Anlieferungsfrequenz unterschiedlich ausfallen können und den Kapitalbindungskosten während des Transports und im nachgelagerten Knoten. Für die Kapitalbindungskosten im nachgelagerten Knoten wird eine durchschnittliche Lagermenge von 50% der Anliefermenge angenommen. Ziel des Modells ist die Minimierung der auf die erste Periode abgezinsten Summe aller Kosten.

$$\min \sum_t q_t \cdot [VK_t + TK_t^{Eigen} + TK_t^{Fremd}] \quad (5-58)$$

Nebenbedingungen

In den Restriktionen (5-59) und (5-60) wird die Anzahl der notwendigen Transportmittel in einer Periode bei einem eigenem Transport bestimmt und es wird dafür gesorgt, dass die sich dadurch ergebene Transportkapazität nicht überschritten wird. Die Kapazität der Transportmittel muss dabei größer sein als die durchschnittliche Transportmenge bei der höchsten Frequenz ($a = 1$) (5-59). Die höchste Transportfrequenz bedeutet eine Lieferung in der kleinsten betrachteten Zeiteinheit (z.B. 1 Tag) und es wird davon ausgegangen, dass ein Transportmittel in dieser Zeiteinheit nur einmal genutzt werden kann. Zusätzlich zu der durchschnittlichen Transportmenge müssen die Transportmittel auch in der Lage sein Transportspitzen zu bewältigen. (5-60) sorgt dafür, dass die Kapazität der Transportmittel ausreicht, um alle Transporte mit der höchsten Frequenz plus der größten Transportmenge einer anderen Frequenz durchzuführen. Der Kapazitätsbedarf einer Komponente ist dabei von der Transportfrequenz abhängig.

$$\sum_{i,v,\hat{v},a} \frac{X_{iv\hat{v}\tau a}^{Transp-T}}{d_{a=1}^{AnzL}} \cdot k_{ia}^{Bed-A} \leq X_{\tau t}^{TM} \cdot k_{\tau}^{TM} \quad \forall \tau \in T^{Eigen}, t \quad (5-59)$$

$$\sum_{i,v,\hat{v}} \left(\frac{X_{iv\hat{v}\tau a=1t}^{Transp-T}}{d_{a=1}^{AnzL}} + \frac{X_{iv\hat{v}\tau a}^{Transp-T}}{d_a^{AnzL}} \right) \cdot k_{ia}^{Bed-A} \leq X_{\tau t}^{TM} \cdot k_{\tau}^{TM} \quad \forall \tau \in T^{Eigen}, t, a \neq 1 \quad (5-60)$$

Werden in einer Periode mehr Transportmittel benötigt als in der Vorperiode, so müssen diese zusätzlichen Transportmittel beschafft werden. Restriktion (5-61) setzt die hierfür notwendige Integervariable. Die Anzahl der Transportmittel zu Beginn des Betrachtungszeitraums wird mit (5-62) dem Modell übergeben.

$$X_{\tau t}^{TM} - X_{\tau t-1}^{TM} \leq X_{\tau t}^{TM-Neu} \quad \forall \tau \in T^{Eigen}, t \quad (5-61)$$

$$X_{\tau t=0}^{TM} = d_{\tau}^{TM-Init} \quad \forall \tau \in T^{Eigen} \quad (5-62)$$

Analog zu den eigenen Transportmitteln erfolgt die Einhaltung der Kapazitätsgrenzen bei den externen Speditionen. Auch hier müssen die vorhandenen Kapazitäten ausreichen um die durchschnittliche Transportmenge (5-63) und die größte Transportspitze (5-64) zu bewältigen.

$$\sum_{i,v,\hat{v},a} \frac{X_{iv\hat{v}\tau a}^{Transp-T}}{d_{a=1}^{AnzL}} \cdot k_{ia}^{Bed-A} \leq \sum_n Y_{\tau nt}^{T-N} \cdot k_{\tau n}^T \quad \forall \tau \notin T^{Eigen}, t \quad (5-63)$$

$$\sum_{i,v,\hat{v}} \left(\frac{X_{iv\hat{v}\tau a=1t}^{Transp-T}}{d_{a=1}^{AnzL}} + \frac{X_{iv\hat{v}\tau a}^{Transp-T}}{d_a^{AnzL}} \right) \cdot k_{ia}^{Bed-A} \leq \sum_n Y_{\tau nt}^{T-N} \cdot k_{\tau n}^T \quad \forall \tau, t \notin T^{Eigen}, a \neq 1 \quad (5-64)$$

Zusätzlich zu den Kapazitätsbeschränkungen der Speditionen, muss die Kapazität der Lager eingehalten werden (5-65).

$$\sum_{i,v,a,\tau} k_i^{Bed-I} \cdot \frac{X_{ivj\tau a}^{Transp-T}}{d_a^{AnzL}} \leq k_{jt}^J \quad \forall j, t \quad (5-65)$$

Bei den externen Speditionen darf je Periode nur maximal eine Kapazitätsstufe aktiviert werden, was Restriktion (5-66) sicherstellt.

$$\sum_n Y_{\tau nt}^{T-N} \leq 1 \quad \forall \tau \notin T^{Eigen}, t \quad (5-66)$$

Gibt es Spediteure, in denen ein Rahmenvertrag mit einem Spediteur abgeschlossen werden kann, so werden in Restriktion (5-67) die damit verbundenen minimalen und maximalen Vertragslaufzeiten mit den Speditionen sichergestellt. Ist mit einer Spedition eine Mindesttransportmenge vereinbart worden, so stellt (5-68) sicher, dass diese auch eingehalten wird.

$$Y_{\tau}^T \cdot t_{\tau}^{LZT-Min} \leq \sum_{n,t} Y_{\tau nt}^{T-N} \leq Y_{\tau}^T \cdot t_{\tau}^{LZT-Max} \quad \forall \tau \notin T^{Eigen} \quad (5-67)$$

$$\sum_n Y_{\tau nt}^{T-N} \cdot d_{\tau}^{T-\text{Min}} \leq \sum_{i,v,\hat{v},a} X_{iv\hat{v}\tau at}^{\text{Transp-T}} \quad \forall \tau \notin T^{\text{Eigen}}, t \quad (5-68)$$

Wird in einer Periode bei einem Spediteur eine höhere Kapazitätsstufe als in der vorhergehenden Periode genutzt, so muss die entsprechende Wechselvariable zur Berechnung der Einmalkosten auf 1 gesetzt werden (5-69).

$$Y_{\tau nt}^{T-N} - Y_{\tau \hat{n} t-1}^{T-N} \leq Y_{\tau n \hat{n} t}^{T-KW} \quad \forall \tau \notin T^{\text{Eigen}}, t, n, \hat{n} > n \quad (5-69)$$

Mit Hilfe der Restriktionen (5-70) und (5-71) wird gewährleistet, dass je Kante nur maximal eine Transportfrequenz genutzt wird.

$$X_{iv\hat{v}\tau at}^{\text{Transp-T}} \leq \text{bigM} \cdot Y_{v\hat{v}\tau at}^{\text{Transp-T}} \quad \forall i, v, \hat{v}, t, \tau, a \quad (5-70)$$

$$\sum_a Y_{v\hat{v}\tau at}^{\text{Transp-T}} \leq 1 \quad \forall v, \hat{v}, t, \tau \quad (5-71)$$

Restriktion (5-72) sorgt dafür, dass die im Kapitel 5.1.1.3 festgelegten Transportmengen auf den Kanten auch von einer Spedition in einer Transportfrequenz transportiert werden.

$$\sum_{a,\tau} X_{iv\hat{v}\tau at}^{\text{Transp-T}} = d_{iv\hat{v}t}^{\text{Transp-T}} \quad \forall i, v, \hat{v}, t \quad (5-72)$$

In den letzten beiden Restriktionen wird sichergestellt, dass nur maximal ein Spediteur aus einer Menge alternativer Spediteure gewählt wird.

$$\sum_{t,n} Y_{jnt}^{T-N} \leq Y_{\tau}^T \cdot \text{bigM} \quad \forall \tau \quad (5-73)$$

$$Y_{\tau}^T + \sum_{\hat{\tau} \in T_{\tau}^{\text{Zus}}} Y_{\hat{\tau}}^T \leq 1 \quad \forall \tau \quad (5-74)$$

5.1.2 Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung

Für die Verteilung der Outputfaktoren auf die parallelen Fließlinien wird das Verfahren von Gans [Gan09] übernommen. Das Verfahren zur Austaktung und Reihenfolgebildung wurde von Altemeier [Alt09], [AHD10] abgeleitet. Im Folgenden werden die Verfahren beschrieben und in Kapitel 5.2 in ein Gesamtverfahren zur Bewertung unterschiedlicher Gleichteilestrategien eingeordnet.

5.1.2.1 Verfahren zur Strukturierung von Arbeitssystemen mit getakteter Fließfertigung

Gans [Gan09] beschreibt in seiner Arbeit ein Clusterverfahren mit dem die Aufteilung der unterschiedlichen Produkte des Plan-Produktionsprogramms auf parallele Linien ermöglicht wird. Hierfür verwendet Gans das k-Means Verfahren. Dabei wird für jede

Linie ein Clusterzentrum gewählt und anschließend werden alle Aufträge des Plan-Produktionsprogramms so auf die verschiedenen Cluster verteilt, dass die Cluster jeweils eine möglichst homogene Belastung im Montageprozess erzeugen. Gans definiert hierbei das Ähnlichkeitsmaß zwischen zwei Aufträgen über die euklidische Distanz zwischen den Belastungsvektoren (5-75). Ein Belastungsvektor enthält dabei die Bearbeitungszeiten des Auftrags an den unterschiedlichen Arbeitsstationen. Da einige Produkte spezielle Ressourcen benötigen, die nicht an allen Produktionslinien vorgehalten werden sollen, ist darauf zu achten, dass bei der Verteilung der Produkte mögliche Ressourcenbeschränkungen mit Berücksichtigt werden.

$$d_{ii}^{Dist} = \sqrt{\sum_w (t_{iw}^{Bearb-I-W} - t_{iw}^{Bearb-I-W})^2} \quad (5-75)$$

Zur Bestimmung der initialen Clusterzentren schlägt Gans drei unterschiedliche Möglichkeiten vor:

1. Zufälliges Erzeugen der Zentren: Es wird für jeden Cluster ein Belastungsvektor erstellt, der mit Zufallszahlen aus einem vorab definierten Bereich gefüllt wird.
2. Zufällige Auswahl: Aus der Menge der Aufträge wird zufällig für jeden Cluster ein Auftrag ausgewählt, der das Clusterzentrum repräsentiert.
3. Gleichmäßige Zeitabstände: Für jeden Auftrag wird die Gesamtmontagezeit berechnet. Die Auswahl der Clusterzentren erfolgt dann so, dass die Differenzen zwischen den Gesamtzeiten der Clusterzentren möglichst gleich sind.

Die Aufträge werden nacheinander auf die Cluster verteilt. Dabei wird versucht die Aufträge immer dem Cluster zuzuordnen, in denen die euklidische Distanz zwischen dem Clusterzentrum und dem einzuplanenden Auftrag am geringsten ist. Ist jedoch die Kapazitätsgrenze eines Clusters erreicht, wird der Auftrag dem Cluster mit der zweitkleinsten Distanz zugeordnet usw. Nach der Zuordnung eines Auftrags zu einem Cluster wird das entsprechende Clusterzentrum neu berechnet. Die Mittelwerte der Bearbeitungszeiten aller dem Cluster zugeordneten Aufträge auf jeder Station repräsentiert das neue Clusterzentrum (5-76).

$$t_{cw}^{CZ-W} = \frac{1}{|I_c^C|} \cdot \sum_{i \in I_c^C} t_{iw}^{Bearb-I-W} \quad (5-76)$$

Um sicherzustellen, dass keine Aufträge zu Linien zugeordnet werden, an denen nicht alle notwendigen Ressourcen vorhanden sind, stellt Gans drei Maßnahmen vor. Die erste Maßnahme ist eine Sortierung der Aufträge nach der Anzahl der Linien, auf denen sie produziert werden können, in aufsteigender Reihenfolge. Die Aufträge werden in dieser Reihenfolge den Clustern zugeordnet. Die zweite Maßnahme ist eine Erweiterung des Distanzmaßes um den Ressourcenbedarf. Hierbei wird für jede Ressource das Res-

sourcenangebot der Linie mit dem Ressourcenbedarf des Auftrags mit Hilfe von Binärvariablen verglichen. Das Ergebnis wird quadriert und mit einem Faktor gewichtet in die Distanzberechnung aufgenommen (5-77). Dadurch werden Aufträge zuerst Clustern zugeordnet, die tendenziell weniger Ressourcen bereitstellen, wodurch die Wahrscheinlichkeit sinkt, dass Aufträge im späteren Verlauf nicht mehr zugeordnet werden können. Das Gesamtverfahren zur Verteilung der Aufträge wird in *Abbildung 5-1* dargestellt.

$$d_{ii}^{Dist} = \sqrt{\sum_w (t_{iw}^{Bearb-I-W} - t_{iw}^{Bearb-I-W})^2} + \sum_{\rho} (z_{i\rho}^{I-P} - z_{i\rho}^{I-P})^2 \cdot u^{P-CD} \quad (5-77)$$

Die letzte Maßnahme ist das Verschieben von bereits zugeordneten Aufträgen in andere Cluster. Diese Maßnahme wird angewendet, wenn ein Auftrag keinem freien Cluster mehr zugeordnet werden kann. Gans beschreibt dabei einen Algorithmus für das einfache (*Abbildung 5-2*) und das mehrfache (*Abbildung 5-3*) Verschieben. Beim einfachen Verschieben, wird ein bereits zugeordneter Auftrag in ein anderes Cluster verschoben. Der dadurch frei gewordene Platz wird durch den Auftrag belegt, der aufgrund seiner Ressourcenanforderungen vorher nicht zugeordnet werden konnte. Beim mehrfachen Verschieben werden mehrere Aufträge nacheinander verschoben, bis eine gültige Zuteilung erreicht wird.

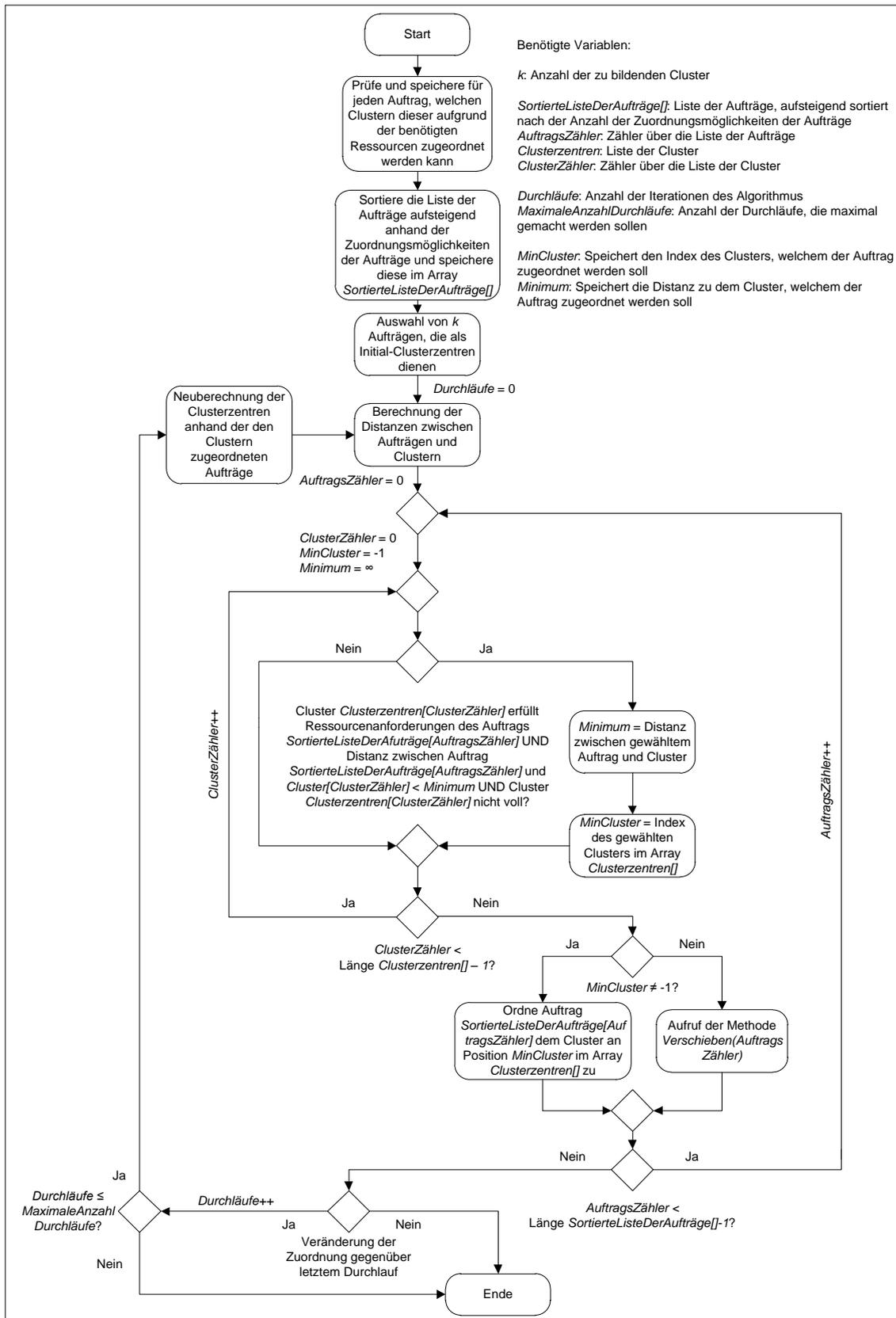


Abbildung 5-1: Algorithmus zur Verteilung der Aufträge auf die Cluster [Gan09]

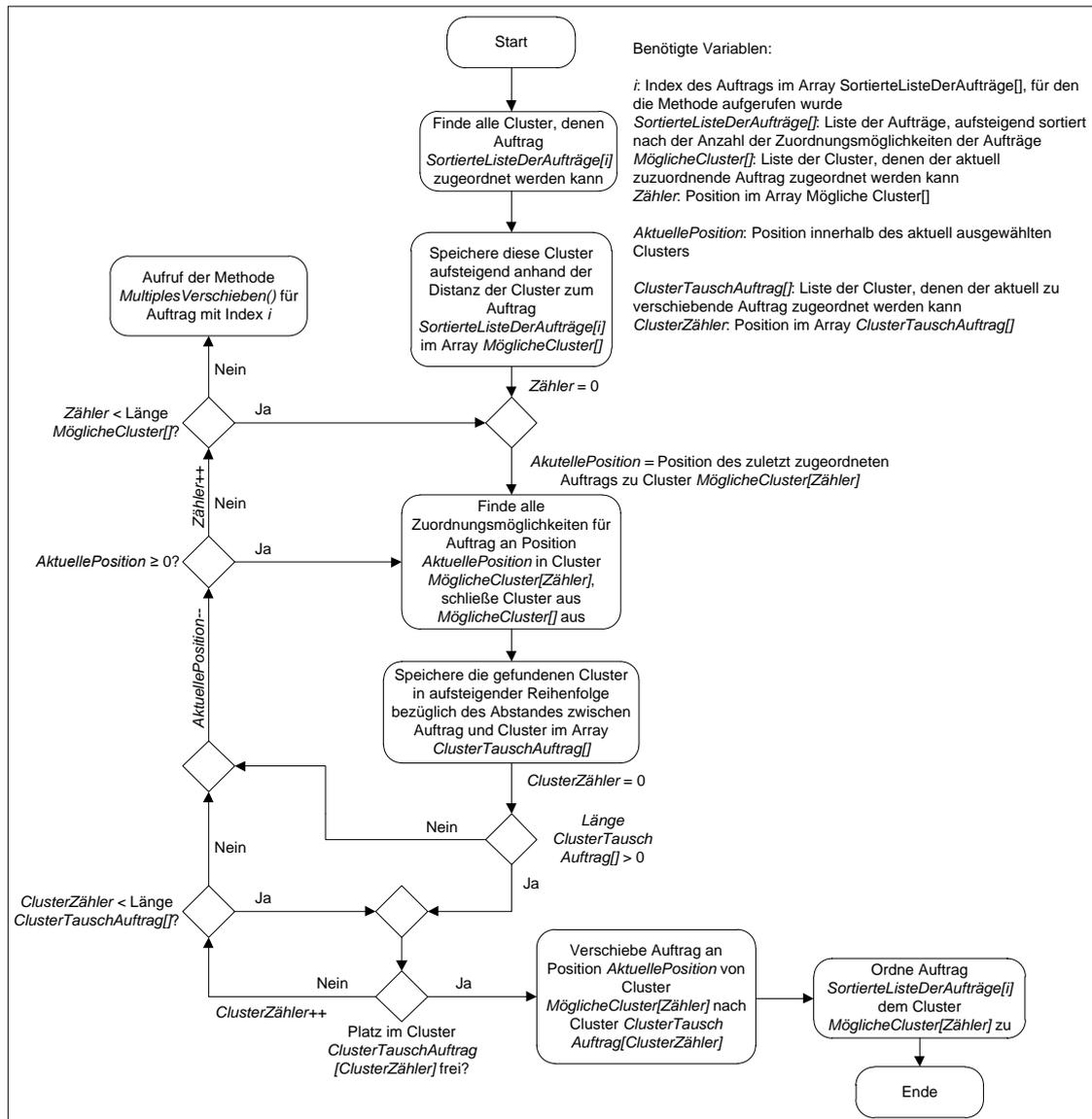


Abbildung 5-2: Algorithmus zur Auftragsverschiebung [Gan09]

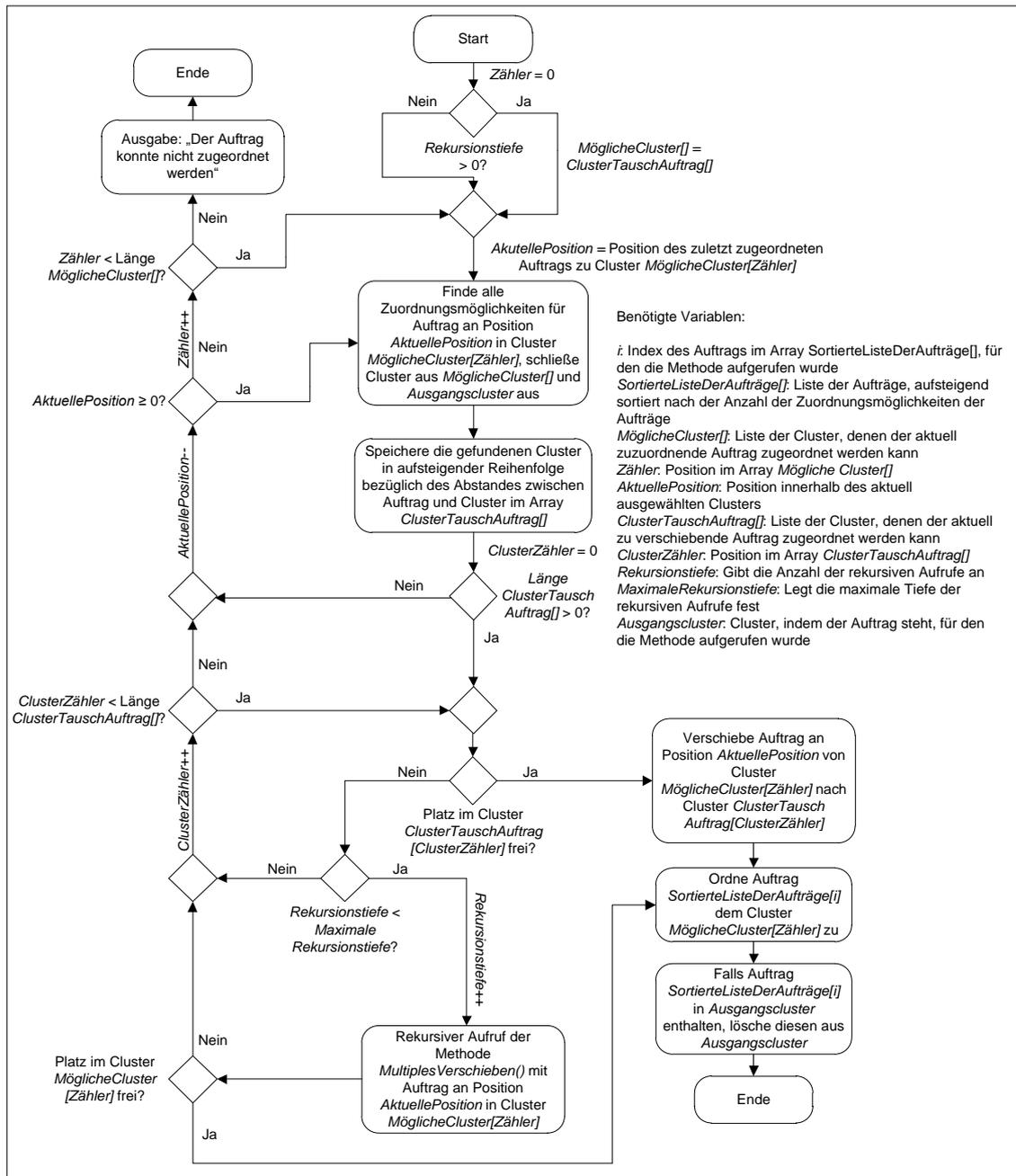


Abbildung 5-3: Algorithmus zur mehrfachen Auftragsverschiebung [Gan09]

5.1.2.2 Austaktung und Simulation der Arbeitssysteme mit Fließlinienfertigung zur Bestimmung der notwendigen Arbeitskräfte

Altemeier [Alt09], [AHD10] beschreiben einen Ansatz zur Rekonfiguration von Fließmontagesystemen in der Automobilindustrie. Ziel hierbei ist es, die Arbeitsinhalte so auf die unterschiedlichen Arbeitsplätze der Montagelinie zu verteilen, dass die Anzahl der notwendigen Arbeitskräfte minimiert wird. Da in der Praxis ein Vorranggraph, der die technischen Vorrangbeziehungen zwischen den einzelnen Arbeitsvorgängen beinhaltet, oft nicht in elektronischer Form vorliegt, haben Altemeier ein Entscheidungsun-

terstützungssystem entwickelt. Die Bedienung dieses Systems muss durch einen Experten erfolgen, der die technischen Vorrangbeziehungen des Vorranggraphen kennt. Das Entscheidungsunterstützungssystem liefert dem Experten neben unterschiedliche Kennzahlen auch eine visuelle Unterstützung.

Mit Hilfe der Nutzung eines Plan-Produktionsprogramms, wie es schon Gans [Gan09] verwendet hat, kann das ursprünglich für operative Fragestellungen entwickelte Verfahren von Altemeier dazu genutzt werden, die Auswirkungen von Gleichteilen auf die Montage frühzeitig abzuschätzen. Hierfür ist neben dem Plan-Produktionsprogramm eine bestehende Montagelinie notwendig. Dazu kann entweder eine bestehende, vergleichbare Linie genutzt werden oder eine neue Linie muss im System erstellt werden. Eine bestehende Linie kann insbesondere dann genutzt werden, wenn die zu analysierenden Produkte Nachfolger bestehender Produkte sind. Dabei müssen jedoch die bestehenden Arbeitsvorgänge auf die Änderungen des Nachfolgeprodukts angepasst und ggf. Arbeitsvorgänge gelöscht oder neu erstellt werden. Ist keine vergleichbare Montagelinie vorhanden, müssen die Arbeitsvorgänge für die Montage der Produkte erstellt werden. Anschließend sind diese Arbeitsvorgänge von einem Experten in einer ersten Austaktung unter Beachtung der technischen Vorrangbeziehungen auf Arbeitsplätze zu verteilen. Dabei wird im ersten Schritt ein Montagearbeitsplatz erstellt und es werden solange Arbeitsvorgänge auf diesen Arbeitsplatz zugeordnet, bis die durchschnittliche Auslastung des Arbeitsplatzes¹⁰⁷ nahezu der Taktzeit entspricht. Anschließend wird die nächste Montagestation erstellt und mit Arbeitsvorgängen gefüllt usw. Ist eine erste Austaktung der Montagelinie vorhanden, kann diese Startlösung für das Verfahren von Altemeier genutzt werden, um die Linie optimal an das Plan-Produktionsprogramm anzupassen.

Altemeier gliedert sein Vorgehen in vier Phasen: die Analyse-, die Design-, die Auswahl- und die Implementations-Phase. In der Analysephase werden Kennzahlen berechnet, anhand derer die Identifikation problematischer Arbeitsplätze erfolgt. In der Design-Phase wird sowohl eine visuelle Entscheidungsunterstützung als auch eine Kennzahl zur Generierung alternativer Lösungen bereitgestellt. Ziel ist es, Arbeitsvorgänge zu identifizieren, deren Verschiebung zu einer Verbesserung der Austaktung führt. Für die Auswahl-Phase stellt Altemeier eine Versionierungssystematik bereit, mit der ein Vergleich unterschiedlicher Austaktungen ermöglicht wird. Ziel ist die Auswahl der wirtschaftlich sinnvollsten Austaktung, die anschließend in der Implementierungsphase¹⁰⁸ installiert wird.

¹⁰⁷ Definition s.u.

¹⁰⁸ Da die Austaktung lediglich zur Kostenberechnung genutzt wird, kann auf die Implementierungsphase verzichtet werden.

Analyse-Phase

Die Kennzahlen für die Analyse-Phase sind die durchschnittliche Arbeitsplatzauslastung, der prozentuale Taktausgleich sowie die lineare und quadratische Übertaktzeit. Die durchschnittliche Auslastung eines Arbeitsplatzes gibt die Zeit an, die ein Werker an einem Arbeitsplatz durchschnittlich pro Fahrzeug arbeitet und wird über die Summe der Bearbeitungszeiten aller Arbeitsvorgänge des Arbeitsplatzes multipliziert mit der jeweiligen Baurate berechnet. Die Baurate eines Arbeitsvorgangs ist dabei die prozentuale Häufigkeit, mit der ein Arbeitsvorgang für ein Produktionsprogramm benötigt wird (5-78).

$$t_w^{Durch-W} = \sum_{\alpha \in A_w} t_{\alpha}^{Bearb-A} \cdot u_{\alpha}^{Baurate} \quad \forall w \quad (5-78)$$

Eine Kennzahl zur Identifikation von Arbeitsplätzen, die mit Hilfe des Entscheidungsunterstützungssystems weiter optimiert werden können, ist der prozentuale Taktausgleich. Dieser ergibt sich aus dem Quotienten aus durchschnittlicher Arbeitsplatzauslastung und der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit des Arbeitsplatzes subtrahiert von 1 (5-79). Die Kennzahl gibt an, wie viel Prozent seiner Arbeitszeit ein Werker nicht beschäftigt ist. Können genügend Arbeitsplätze gefunden werden, wo die Summe der Taktausgleiche größer als 1 ist, so kann ggf. ein Arbeitsplatz eingespart werden¹⁰⁹.

$$u_w^{TA} = 1 - \frac{t_w^{Durch-W}}{t_w^{Kapa-W}} \quad \forall w \quad (5-79)$$

Altemeier hat nachgewiesen, dass die Anzahl von Springern mit dem linearen Übertakt korreliert. Beim linearen Übertakt wird die Bearbeitungszeit jedes Auftrags im Produktionsprogramm auf einem Arbeitsplatz mit der zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit auf diesem Arbeitsplatz verglichen. Ist die Differenz positiv, so wird sie zum linearen Übertakt des Arbeitsplatzes aufsummiert (5-80). Es müssen Arbeitsplätze mit hohem linearem Übertakt identifiziert werden um die Wahrscheinlichkeit für den Einsatz und die Anzahl von Springern zu reduzieren. Neben dem linearen Übertakt wird auch der quadratische Übertakt je Arbeitsplatz berechnet (5-81). Hierbei werden große Abweichungen der Bearbeitungszeit des Arbeitsplatzes besonders stark gewichtet.

$$t_w^{\ddot{U}T-lin} = \sum_i \max(0; t_{iw}^{Bearb-I-W} - t_w^{Kapa-W}) \quad \forall w \quad (5-80)$$

$$t_w^{\ddot{U}T-quad} = \sum_i \begin{cases} (t_{iw}^{Bearb-I-W} - t_w^{Kapa-W})^2 & , \text{wenn } t_{iw}^{Bearb-I-W} > t_w^{Kapa-W} \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases} \quad \forall w \quad (5-81)$$

¹⁰⁹ Die technischen Vorrangbeziehungen und die nicht unendliche Teilbarkeit der Arbeitsvorgänge verhindern die optimale Realisierung der Potentiale in der Montagelinie. Daher sollten Arbeitsplätze gefunden werden, deren summierter Taktausgleich deutlich größer als 1 ist.

Da ein hoher Taktausgleich dazu führen kann, dass trotz hohem linearen Übertakt auf einem Arbeitsplatz relativ wenig Springer eingesetzt werden, schlägt Altemeier die Division der Übertaktzeiten mit dem Taktausgleich vor (5-82) und (5-83). Je höher dieser Quotient ist, desto mehr Potential zur Vermeidung von Springern ist auf dem entsprechenden Arbeitsplatz vorhanden. Die quadratische Kennzahl dient wiederum zur stärkeren Gewichtung großer Abweichungen.

$$u_w^{\ddot{U}T-lin} = \frac{t_w^{\ddot{U}T-lin}}{u_w^{TA}} \quad \forall w \quad (5-82)$$

$$u_w^{\ddot{U}T-quad} = \frac{t_w^{\ddot{U}T-quad}}{u_w^{TA}} \quad \forall w \quad (5-83)$$

Design-Phase

In der Design-Phase wird im ersten Schritt die Belastung auf den verschiedenen Arbeitsplätzen visualisiert. Dabei wird die Häufigkeit jeder Bearbeitungszeit eines Arbeitsplatzes in Form eines Balkendiagramms dargestellt. Die Häufigkeit einer Bearbeitungszeit eines Arbeitsplatzes ergibt sich aus der Summe der Aufträge, die genau diese Bearbeitungszeit auf dem betrachteten Arbeitsplatz benötigen (5-84).

$$d_{tw}^{T-W} = \sum_{i | t_{iw}^{Bearb-I-W} = t} 1 \quad \forall w, t \quad (5-84)$$

Da jedoch an einigen Arbeitsplätzen sehr viele unterschiedliche Bearbeitungszeiten für ein Produktionsprogramm auftreten können, werden die Bearbeitungszeiten in Clustern gruppiert. Die Häufigkeiten werden nicht mehr über jede Bearbeitungszeit, sondern über jedes Cluster aufgetragen (5-85).

$$d_{cw}^{C-W} = \sum_{i | t_c^{C-Min} \leq t_{iw}^{Bearb-I-W} < t_c^{C-Max}} 1 \quad \forall w, c \quad (5-85)$$

Durch die Visualisierung der Bearbeitungszeiten wird eine genauere Analyse der Belastungssituation eines Arbeitsplatzes ermöglicht. Um die Auswirkungen von Verschiebungen von Arbeitsvorgängen zwischen verschiedenen Arbeitsplätzen besser nachvollziehen zu können, bietet Altemeier eine graphische Analyse an. Dabei werden Änderungen in den Clusterhäufigkeiten in unterschiedlichen Farben oder Mustern dargestellt. Diese Darstellung kann dazu genutzt werden, Arbeitsvorgänge auszuwählen, deren Verschiebung auf einen anderen Arbeitsplatz die Belastungssituation der Montagelinie verbessert. *Abbildung 5-4* zeigt beispielhaft eine solche Visualisierung.

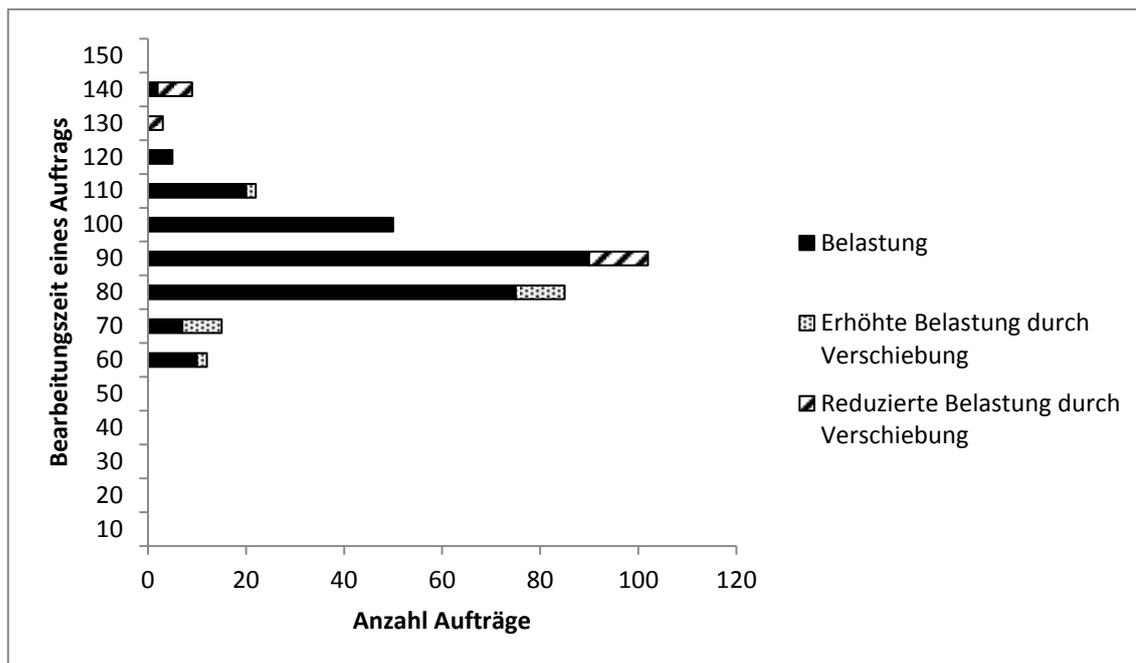


Abbildung 5-4: Beispielhafte Veränderung der Arbeitsbelastungen auf einem Arbeitsplatz beim Tausch zweier AVs nach [AHD10]

Neben der graphischen Unterstützung beschreibt Altemeier eine Kennzahl zur Identifikation von Arbeitsvorgängen, deren Verschiebung zu einer Verbesserung der Arbeitsplatzauslastungen führt. Diese Kennzahl wird AIA (Auslastung im Arbeitsplatz) genannt und beschreibt, ob die Durchführung eines Arbeitsvorgangs zu hohen Belastungen auf einem Arbeitsplatz führt. Zur Berechnung der AIA werden zunächst alle Aufträge identifiziert, die den betrachteten Arbeitsvorgang benötigen. Dann wird die durchschnittliche Bearbeitungszeit dieser Aufträge auf dem betrachteten Arbeitsplatz berechnet und durch die Kapazität des Arbeitsplatzes dividiert (5-86).

$$u_{\alpha w}^{AIA} = \frac{\frac{1}{|I_{\alpha}^A|} \cdot \sum_{i \in I_{\alpha}^A} t_{iw}^{Bearb-I-W}}{t_w^{Kapa-W}} \quad \forall \alpha, w \in W_{\alpha}^{Pos-A} \quad (5-86)$$

Hat ein Arbeitsvorgang einen AIA Wert größer 1 auf einem Arbeitsplatz, so bedeutet das, dass er für Fahrzeuge benötigt wird, die überdurchschnittliche Belastungen auf diesem Arbeitsplatz erzeugen. Ziel ist es Arbeitsvorgänge zu identifizieren, deren AIA Wert auf ihrem bisherigen Arbeitsplatz möglichst hoch und größer 1 und auf einem anderen Arbeitsplatz möglichst kleiner 1 ist. Bei der Berechnung der AIA Kennzahl auf einem anderen als dem gerade zugeordneten Arbeitsplatz, muss die Ausführungszeit des betrachteten Arbeitsvorgangs zu den Bearbeitungszeiten addiert werden. Dadurch wird die AIA Kennzahl so berechnet, als wäre der betrachtete Arbeitsvorgang bereits dem neuen Arbeitsplatz zugeordnet. Dem Anwender wird eine Liste von möglichen Verschiebungen von Arbeitsvorgängen präsentiert aus der er dann unter Beachtung der

technischen Vorrangbeziehungen gültige Verschiebungen auswählt und dadurch die Belastung der Montagelinie verbessert.

In einigen Fällen kann eine Verringerung der Montagebelastung erst durch die Verschiebung mehrerer Arbeitsvorgänge erreicht werden. Daher präsentiert Altemeier einen Branch & Bound Algorithmus, bei dem eine bestimmte Anzahl von Vertauschungen hintereinander durchgeführt wird. Aufgrund der hohen Laufzeit, werden dabei nicht alle möglichen Kombinationen an Vertauschungen zugelassen, sondern die Menge an Verschiebemöglichkeiten wird auf eine bestimmte Anzahl der besten Lösungen begrenzt. Der Algorithmus liefert als Ergebnis eine festgelegte Anzahl der besten Lösungen und präsentiert diese dem Anwender. Die Bewertung der unterschiedlichen Lösungen erfolgt über den linearen und quadratischen Übertakt. Der Anwender kann die gefundenen Lösungen auf technische Machbarkeit prüfen und dann ggf. übernehmen.

Auswahl-Phase

Um die Auswahl einer Austaktung zu vereinfachen hat Altemeier eine Verwaltung für unterschiedliche Austaktungsversionen entwickelt. Dabei gibt es bestätigte und unbestätigte Versionen von Austaktungen. Bestätigte Versionen stellen unterschiedliche, technisch mögliche Austaktungen dar, die dauerhaft gespeichert werden sollen. Aus diesen bestätigten Versionen wird anschließend die für das Unternehmen sinnvollste Version ausgewählt. Daneben gibt es noch die unbestätigten Versionen von Austaktungen, die jeweils einer bestätigten Version zugeordnet sind. Hierbei sind sowohl die Verschiebungen protokolliert, die ausgehende von der dazugehörigen bestätigten Austaktung getätigt wurden, als auch die Veränderungen graphisch dargestellt, die sich in der Belastung der Arbeitsplätze durch die Verschiebungen ergeben haben. Diese unbestätigten Versionen stellen Arbeitsversionen dar, die nach einer Überprüfung in bestätigte Versionen umgewandelt werden können.

Die Auswahl der besten Austaktung erfolgt durch den Anwender. Als Auswahlhilfe dienen alle oben beschriebenen Kennzahlen sowie die graphische Auswertung. Prinzipiell sollte die Austaktung mit der geringsten Anzahl an notwendigen Arbeitskräften gewählt werden. Allerdings kann eine Austaktung mit weniger Arbeitskräfte aufgrund vermehrter Springereinsätze durch einen hohen linearen Übertakt trotzdem unwirtschaftlicher sein, als eine Austaktung mit mehr regulären Arbeitskräften. Aus diesem Grund sollten mehrere Austaktungen mit einer geringen Anzahl Arbeitskräfte ausgewählt und anschließend simuliert werden.

Fließliniensimulation

Altemeier hat für die Bewertung einer Austaktung eine Simulation entwickelt. In dieser Simulation wird eine gegebene Austaktung mit einem gegebenen Produktionsprogramm

in einer vorgegebenen Reihenfolge belastet. Dabei wird die Position eines Werkers nach jedem Auftrag berechnet. Dem Werker ist es erlaubt innerhalb seiner Station und in seinem Driftbereich zu arbeiten. Driftet ein Werker, so wird entsprechend der verspätete Startzeitpunkt für den Folgeauftrag berechnet. Falls der nächste Auftrag an einem Arbeitsplatz nicht innerhalb des Driftbereichs beendet werden kann, so wird die Bearbeitungszeit dieses Auftrags auf 0 gesetzt und ein Springereinsatz wird vermerkt¹¹⁰. Die Simulation erlaubt es außerdem Abhängigkeiten zwischen Werkern zu modellieren. So kann es beispielsweise vorkommen, dass ein Werker auf das Bearbeitungsende eines anderen Werkers warten muss.

5.1.3 Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik

Zur Planung der internen Produktionslogistik wurde ein Modell entwickelt, das die kostenoptimale Kombination an Lager- und Transportsystemen für einen Produktionsstandort auswählt. Im Modell werden unterschiedliche Ebenen verwendet, auf denen sich die Lager- und Transportsysteme befinden. Dabei gilt, dass kleinere Ebenen Lager- und Transportsysteme enthalten, die sich bezogen auf eine Komponente zeitlich vor Lager- und Transportsystemen befinden, die höheren Ebenen zugeordnet sind¹¹¹. Das bedeutet, dass jede Komponente das Produktionslogistiknetzwerk von kleineren Ebenen hin zu höheren Ebenen durchläuft. Je Komponente darf nur maximal ein Lagersystem auf jeder Ebene genutzt werden.

Wie das Teilmodell zur Strukturierung und Dimensionierung des Transportnetzwerks, wird das Modell zur Bewertung der internen Produktionslogistik in zwei Teilmodelle zerlegt. Mit Hilfe des ersten Modells werden die Lagersysteme ausgewählt und die Operationen zugeordnet. Das zweite Modell dient der optimalen Auswahl der Transportsysteme. Im Folgenden werden die beiden Modelle vorgestellt und anschließend in Kapitel 5.2 in das Gesamtverfahren zur Bewertung unterschiedlicher Gleichteilestrategien integriert.

¹¹⁰ Der Arbeitsbereich plus Driftbereich eines Arbeitsplatzes muss immer ausreichen, um jeden Auftrag – vorausgesetzt der Auftrag startet am Stationsbeginn – bis zum Ende des Driftbereichs fertigzustellen. Der Driftbereich ist entsprechend zu dimensionieren.

¹¹¹ So befindet sich beispielsweise der Wareneingang auf einer kleineren Ebene, als der Verbauort einer Komponente.

5.1.3.1 Modell zur Auswahl der Lagersysteme, zur Zuordnung von Operationen zu den Lagersystemen und zur Bestimmung der Transportflüsse durch das interne Netzwerk

In diesem Modell erfolgt die kostenoptimale Auswahl von Lagersystemen an einem Produktionsstandort und die Bestimmung der Transportmengen auf den Kanten des Netzwerks. Gleichzeitig werden die in der Planung des Produktions- und Transportnetzwerks dem Standort zugewiesenen Operationen auf die Lagersysteme verteilt. Das Lagern von Komponenten wird hierbei als Operation modelliert. Sind Kapazitäten für Operationen in Transportsystemen oder bei externen Dienstleister vorhanden, können die Operationen auch dort zugeordnet werden¹¹².

Zielfunktion

Die Kosten der Zielfunktion für das Modell zur Lagersystemauswahl setzen sich aus den Lagerkosten, den Transportkosten und den externen Kosten zusammen. Die Lagerkosten beinhalten dabei die Einmal- und Fixkosten für die Errichtung und den Betrieb der Lagersysteme und die Kosten für die in den Lagersystemen durchgeführten Operationen. Dabei bestehen die Kosten für die Operationen aus Einmal- und Fixkosten für die Installation der notwendigen Einrichtungen und den variablen Kosten, jeweils für exklusive und nicht exklusive Operationen.

$$\begin{aligned}
 LK_t = & \sum_j (Y_{jt}^{J-Neu} \cdot c_j^{EK-J}) + \sum_j (Y_{jt}^J \cdot c_j^{Fix-J}) \\
 & + \sum_{j,o} (Y_{jot}^{O-J-Neu} \cdot c_{jo}^{EK-J-O}) + \sum_{j,o} (Y_{jot}^{O-J} \cdot c_{jo}^{Fix-J-O}) \\
 & + \sum_{i,o \in O_{it}^{EX}, j \in J_{jo}^O} (Y_{iojt}^{OEX-J} \cdot d_{iot}^{OEX} \cdot c_{ioj}^{Var-J-O}) \\
 & + \sum_{i,o \in O_{it}^{NEX}, j \in J_{jo}^O} (X_{iojt}^{ONEX-J} \cdot c_{ioj}^{Var-J-O})
 \end{aligned} \tag{5-87}$$

Die Transportkosten setzen sich aus den variablen Kosten für den Transport der Komponenten je Kante und den Kostensätzen für die Durchführung von Operationen auf Transportsystemen zusammen.

$$\begin{aligned}
 TK_t = & \sum_{i,j} c_{ijj}^{Transp} \cdot d_{it} \cdot Y_{ijjt}^{Transp} + \sum_{i,o \in O_{it}^{EX}} Y_{iot}^{OEX-T-G} \cdot d_{iot}^{OEX} \cdot c_{io}^{Var-T-O-G} \\
 & + \sum_{i,o \in O_{it}^{NEX}} X_{iot}^{ONEX-T-G} \cdot c_{io}^{Var-T-O-G}
 \end{aligned} \tag{5-88}$$

¹¹² Die genaue Zuordnung von Operationen zu den einzelnen Transportsystemen erfolgt im nachfolgenden Modell.

Die externen Kosten bestehen aus den variablen Kosten für die Durchführung von Operationen durch externe Dienstleister.

$$\begin{aligned}
 EXTK_t = & \sum_{i,o \in O_{it}^{EX}} Y_{iot}^{O^{EX-Ext}} \cdot d_{iot}^{O^{EX}} \cdot c_{io}^{Var-O-Ext} \\
 & + \sum_{i,o \in O_{it}^{NEX}} X_{iot}^{O^{NEX-Ext}} \cdot c_{io}^{Var-O-Ext}
 \end{aligned} \tag{5-89}$$

Ziel ist es die Summe der Kosten zu minimieren.

$$\min q_t \cdot [LK_t + TK_t + EXTK_t] \tag{5-90}$$

Nebenbedingungen

In Restriktion (5-91) wird dafür gesorgt, dass jede exklusive Operation für jede Komponente genau einem System zugeordnet wird. Dabei kann die Operation entweder in einem Lagersystem oder einem Transportsystem oder extern durchgeführt werden. In (5-92) werden die nicht exklusiven Operationen zugewiesen. Dabei kann die Operation für eine Komponente mehreren Systemen zugeordnet werden. Die Summe der Zuweisungen muss der benötigten Menge an Durchführungen für die Operation entsprechen.

$$\sum_j Y_{iojt}^{O^{EX-J}} + Y_{iot}^{O^{EX-T-G}} + Y_{iot}^{O^{EX-Ext}} = 1 \quad \forall i, t, o \in O_{it}^{EX} \tag{5-91}$$

$$\sum_j X_{iojt}^{O^{NEX-J}} + X_{iot}^{O^{NEX-T-G}} + X_{iot}^{O^{NEX-Ext}} = d_{iot}^{O^{NEX}} \quad \forall i, t, o \in O_{it}^{NEX} \tag{5-92}$$

Soll eine Operation in einem Lagersystem durchgeführt werden, so muss das entsprechende Lagersystem für die Komponente aktiviert werden (5-93). Dabei muss sichergestellt werden, dass auf jeder Ebene je Komponente nur ein Lagersystem aktiviert wird (5-94).

$$\sum_{o \in O_{it}^{EX}} Y_{iojt}^{O^{EX-J}} + \sum_{o \in O_{it}^{NEX}} X_{iojt}^{O^{NEX-J}} \leq Y_{ijt}^{I-J} \cdot bigM \quad \forall i, j, t \tag{5-93}$$

$$\sum_{j \in J_e^E} Y_{ijt}^{I-J} \leq 1 \quad \forall i, e, t \tag{5-94}$$

Es ist möglich im Modell mehrere alternative Lagersysteme für einen Ort im Produktionsstandort anzulegen (5-95).

$$\sum_t Y_{jt}^{J-Neu} + \sum_t Y_{jt}^{J-Neu} \leq 1 \quad \forall j, \hat{j} \in J_j^{Alt}, j < \hat{j}, t \tag{5-95}$$

Wird ein Lagersystem von einer Komponente genutzt, so muss das entsprechende Lager auch aktiviert werden (5-96).

$$\sum_i Y_{ijt}^{I-J} \leq Y_{jt}^J \cdot bigM \quad \forall j, t \tag{5-96}$$

Es kann vorkommen, dass zur Verrichtung einer exklusiven Operation eine andere Operation bereits durchgeführt sein muss. Für einen solchen Fall stellt Restriktion (5-97) sicher, dass diese Operation nur einem Lagersystem zugeordnet werden kann, wenn die vorher benötigten Operationen Lagersystemen auf der gleichen oder einer niedrigeren Ebene bzw. externen Dienstleistern zugeordnet wurden.

$$\sum_{j \leq j} Y_{i\hat{o}jt}^{OEX-J} + Y_{i\hat{o}t}^{OEX-Ext} \geq Y_{iojt}^{OEX-J} \quad \forall i, j, t, o, \hat{o} \in O^{Seq} \quad (5-97)$$

Manche Operationen können nur ausgeführt werden, wenn ein oder mehrere andere Operationen dem gleichen Lager- oder Transportsystem zugeordnet sind. In den Restriktionen (5-98)-(5-101) wird dies für jede Kombination aus exklusiven und nicht exklusiven Operationen für Lagersysteme sichergestellt.

$$Y_{i\hat{o}jt}^{OEX-J} = Y_{iojt}^{OEX-J} \quad \forall i, j, t, o \in O_{it}^{EX}, \hat{o} \in \{O_{it}^{EX} \cap O^{Zus}\} \quad (5-98)$$

$$Y_{i\hat{o}jt}^{OEX-J} \cdot bigM \geq X_{iojt}^{OEX-J} \quad \forall i, j, t, o \in O_{it}^{NEX}, \hat{o} \in \{O_{it}^{EX} \cap O^{Zus}\} \quad (5-99)$$

$$X_{i\hat{o}jt}^{OEX-J} \geq d_{io\hat{o}}^{Zus-EX} \cdot Y_{iojt}^{OEX-J} \quad \forall i, j, t, o \in O_{it}^{EX}, \hat{o} \in \{O_{it}^{NEX} \cap O^{Zus}\} \quad (5-100)$$

$$X_{i\hat{o}jt}^{OEX-J} \geq d_{io\hat{o}}^{Zus-NEX} \cdot X_{iojt}^{OEX-J} \quad \forall i, j, t, o \in O_{it}^{NEX}, \hat{o} \in \{O_{it}^{NEX} \cap O^{Zus}\} \quad (5-101)$$

Gibt es mehrere Orte, an denen eine Setbildung erfolgen kann, so muss sichergestellt werden, dass für alle Komponenten i aus denen das Set \hat{i} besteht die exklusiven Operationen „Set-Bildung“ im gleichen Lagersystem erfolgt, wie die Operation „Set-Start“ der neuen Set-Komponente.

$$Y_{iojt}^{OEX} = Y_{i\hat{o}jt}^{OEX} \quad (5-102)$$

$$\forall t, j, i, \hat{i} \in I_i^{Set}, o = o_{Set-Start}, \hat{o} = o_{Set-Bildung}$$

In Restriktion (5-103) wird die Flussverhaltung im Produktionslogistiknetzwerk sichergestellt, indem dafür gesorgt wird, dass jede Komponente, die in ein Lagersystem einfließt, dieses auch wieder verlässt. Dabei kann eine Komponente aus einem anderen Lagersystem geliefert werden oder von außen in das Produktionslogistiksystem eingeführt werden (z.B. am Wareneingang). Genauso kann eine Komponente entweder zu einem anderen Lagersystem transportiert oder verbraucht werden (entweder an ihrem Verbauort oder bei der Bildung eines Sets). Die dafür notwendige Flussvariable Y^{Transp} wird durch die Gleichungen (5-104) mit den Aktivierungsvariablen der Lagersysteme in Verbindung gesetzt.

$$\sum_{o \in \{o_{Quelle}, o_{Set-Start}\}} Y_{iojt}^{OEX-J} + \sum_{\{j|j < j\}} Y_{ijjt}^{Transp} \quad (5-103)$$

$$= \sum_{o \in \{o_{Senke}, o_{Set-Bildung}\}} Y_{iojt}^{OEX-J} + \sum_{\{j|j > j\}} Y_{ijjt}^{Transp} \quad \forall i, j, t$$

$$\sum_{o \in \{o_{Senke}, o_{Set-Bildung}\}} Y_{iojt}^{OEX-J} + \sum_{\{j|j>j\}} Y_{ijjt}^{Transp} = Y_{ijt}^{I-J} \quad \forall i, j, t \quad (5-104)$$

In den Restriktionen (5-105)-(5-106) wird die Einhaltung der Kapazitätsbeschränkungen für Operationen sichergestellt. Dies erfolgt für exklusive (5-105) und nicht exklusive (5-106) Operationen.

$$\sum_i Y_{iojt}^{OEX-J} \cdot d_{iot}^{OEX} \cdot k_{ioj}^{Bed-O-J} \leq k_{jo}^{J-O} \cdot Y_{jt}^J \quad \forall j, t, o \in O_t^{GEX} \quad (5-105)$$

$$\sum_i X_{iojt}^{ONEX-J} \cdot k_{ioj}^{Bed-O-J} \leq k_{jo}^{J-O} \cdot Y_{jt}^J \quad \forall j, t, o \in O_t^{GNEX} \quad (5-106)$$

Ebenso müssen die Kapazitätsbeschränkungen der externen Einrichtungen (für exklusive (5-107) und nicht exklusive (5-108) Operationen) und der Transportsysteme (für exklusive (5-109) und nicht exklusive (5-110) Operationen) eingehalten werden.

$$\sum_i X_{iot}^{ONEX-Ext} \leq k_o^{O-Ext} \quad \forall t, o \in O_t^{GNEX} \quad (5-107)$$

$$\sum_i Y_{iot}^{OEX-Ext} \cdot d_{iot}^{OEX} \leq k_o^{O-Ext} \quad \forall t, o \in O_t^{GEX} \quad (5-108)$$

$$\sum_i X_{iot}^{ONEX-T-G} \leq k_o^{T-O-G} \quad \forall t, o \in O_t^{GNEX} \quad (5-109)$$

$$\sum_i Y_{iot}^{OEX-T-G} \cdot d_{iot}^{OEX} \leq k_o^{T-O-G} \quad \forall t, o \in O_t^{GEX} \quad (5-110)$$

Werden Operationen für Komponenten in bestimmten Lagern durchgeführt, so müssen diese Operationen in den Lagersystemen auch aktiviert werden (5-111)-(5-112). Sind Operationen in einer Kapazitätsstufe aktiviert, so muss auch das Lagersystem aktiviert sein (5-113).

$$\sum_i Y_{iojt}^{OEX-J} \leq Y_{jot}^{O-J} \cdot bigM \quad \forall j, t, o \in O_t^{GEX} \quad (5-111)$$

$$\sum_i X_{iojt}^{ONEX-J} \leq Y_{jot}^{O-J} \cdot bigM \quad \forall j, t, o \in O_t^{GNEX} \quad (5-112)$$

$$\sum_o Y_{jot}^{O-J} \leq Y_{jt}^J \cdot bigM \quad \forall j, t \quad (5-113)$$

Abschließend stellt Restriktion (5-114) sicher, dass Lager, die im Betrachtungszeitraum genutzt werden, auch eröffnet werden. Gleiches gilt für die Einrichtungen zur Durchführung von Operationen (5-115).

$$Y_{jt}^J - Y_{jt-1}^J \leq Y_{jt}^{J-Neu} \quad \forall j, t \quad (5-114)$$

$$Y_{jot}^{O-J} - Y_{jot-1}^{O-J} \leq Y_{jot}^{O-J-Neu} \quad \forall j, t \quad (5-115)$$

5.1.3.2 Modell zur Auswahl der Transportsysteme und zur Zuordnung der Operationen zu Transportsystemen

Im vorliegenden Modell werden die Transportsysteme für die im vorherigen Modell bestimmten Transportflüsse ausgewählt. Dabei kann zwischen stetigen und unstetigen Transportsystemen gewählt werden. Bei unstetigen Transportsystemen wird zusätzlich die Anzahl benötigter Betriebsmittel bestimmt. Außerdem erfolgt für jedes Transportsystem die Festlegung der Routen, auf denen das Transportsystem eingesetzt wird. Die den Transportsystemen zugeordneten Operationen werden auf die Transportsysteme verteilt. Sind noch Restkapazitäten in den Lagersystemen vorhanden, so können die Operationen auch den Lagersystemen zugeordnet werden. Ebenfalls können externe Dienstleister für die Durchführung bestimmter Operationen beauftragt werden.

Zielfunktion

Die Kosten im Modell Transportsystemauswahl setzen sich aus den Lagerkosten, den Transportkosten und den externen Kosten zusammen. Die Lagerkosten beinhalten dabei lediglich die variablen Kosten für die Durchführung von Operationen.

$$LK_t = \sum_{i,o \in O_{it}^{EX}} \left(Y_{iot}^{OEX-J-G} \cdot d_{iot}^{OEX} \cdot c_{io}^{Var-J-O-G} \right) + \sum_{i,o \in O_{it}^{NEX}} \left(X_{iot}^{OEX-J-G} \cdot c_{io}^{Var-J-O-G} \right) \quad (5-116)$$

Die Transportkosten setzen sich aus den routenunabhängigen Kosten für die Installation und den Betrieb der Transportsysteme, den Kosten für die Beschaffung der Transportmittel bei unstetigen Transportsystemen, den Kosten für die Durchführung von Operationen und Kosten für die Installation der unterschiedlichen Routen eines Transportsystems zusammen. Zusätzlich dazu fallen variable Transportkosten und variable Kosten für die Durchführung der Operationen an.

$$\begin{aligned}
TK_t = & \sum_{\tau} Y_{\tau t}^{T-Neu} \cdot c_{\tau}^{EK-T} + \sum_{\tau} Y_{\tau t}^T \cdot c_{\tau}^{Fix-T} + \sum_{\tau \in T_{\tau}^{US}} X_{\tau t}^{TM-Neu} \cdot c_{\tau}^{EK-T-US} \\
& + \sum_{\tau \in T_{\tau}^{US}} X_{\tau t}^{TM} \cdot c_{\tau}^{Fix-T-US} + \sum_{\tau, o} Y_{\tau o t}^{O-T-Neu} \cdot c_{\tau o}^{EK-T-O} \\
& + \sum_{\tau, o} Y_{\tau o t}^{O-T} \cdot c_{\tau o}^{Fix-T-O} + \sum_{\tau, r} Y_{\tau r t}^{T-R-Neu} \cdot c_{\tau r}^{EK-R} \\
& + \sum_{\tau, r} Y_{\tau r t}^{T-R} \cdot c_{\tau r}^{Fix-R} + \sum_{i, \tau, r} Y_{i \tau r t}^R \cdot d_{it} \cdot c_{\tau}^{Var-T} \\
& + \sum_{i, o \in O_{it}^{EX, \tau}} Y_{i o t t}^{O^{EX-T}} \cdot d_{i o t}^{O^{EX}} \cdot c_{i o t}^{Var-T-O} \\
& + \sum_{i, o \in O_{it}^{NEX, \tau}} X_{i o t t}^{O^{NEX-T}} \cdot c_{i o t}^{Var-T-O}
\end{aligned} \tag{5-117}$$

Die externen Kosten setzen sich aus den variablen Kosten für die Durchführung von Operationen zusammen.

$$\begin{aligned}
EXTK = & \sum_{i, o \in O_{it}^{EX}} Y_{i o t}^{O^{EX-Ext}} \cdot d_{i o t}^{O^{EX}} \cdot c_{i o}^{Var-O-Ext} \\
& + \sum_{i, o \in O_{it}^{NEX}} X_{i o t}^{O^{NEX-Ext}} \cdot c_{i o}^{Var-O-Ext}
\end{aligned} \tag{5-118}$$

Ziel ist es die Summe der Kosten zu minimieren (5-119).

$$\min q_t \cdot [LK_t + TK_t + EXTK_t] \tag{5-119}$$

Nebenbedingungen

In Restriktion (5-120) wird dafür gesorgt, dass jede exklusive Operation für eine Komponente genau einem System zugeordnet wird. Dabei kann die Operation entweder durch ein Lagersystem oder ein Transportsystem oder extern durchgeführt werden. In (5-121) werden die nicht exklusiven Operationen zugewiesen. Dabei kann die Operation für eine Komponente mehreren Systemen zugeordnet werden. Die Summe der Zuweisungen muss der benötigten Menge an Durchführungen für die Operation entsprechen.

$$Y_{i o t}^{O^{EX-J-G}} + \sum_{\tau} Y_{i o \tau t}^{O^{EX-T}} + Y_{i o t}^{O^{EX-Ext}} = 1 \quad \forall i, t, o \in O_{it}^{EX} \tag{5-120}$$

$$Y_{i o t}^{O^{EX-J-G}} + \sum_{\tau} X_{i o \tau t}^{O^{NEX-T}} + X_{i o t}^{O^{NEX-Ext}} = d_{i o t}^{O^{NEX}} \quad \forall i, o \in O_{it}^{NEX} \tag{5-121}$$

Es ist möglich im Modell mehrere alternative Transportsysteme anzulegen. (5-122) stellt sicher, dass nur eine dieser Alternativen gewählt wird. Gleiches gilt für Routen eines Transportsystems (5-123).

$$\sum_t Y_{\tau t}^{T-Neu} + \sum_t Y_{\hat{\tau} t}^{T-Neu} \leq 1 \quad \forall \tau, \hat{\tau} \in T_{\tau}^{Alt}, \tau < \hat{\tau} \quad (5-122)$$

$$\sum_t Y_{\tau r t}^{T-R-Neu} + \sum_t Y_{\hat{\tau} r t}^{T-R-Neu} \leq 1 \quad \forall \tau, r, \hat{\tau} \in R_{\tau r}^{Alt}, r < \hat{\tau} \quad (5-123)$$

Wird eine Komponente auf einem Transportsystem auf einer Route transportiert, so muss das entsprechende Transportsystem für diese Komponente aktiviert werden (5-124). Anschließend kann überprüft werden, ob das Transportsystem (5-125) aktiviert werden muss. In (5-126) erfolgt die Aktivierung der genutzten Routen.

$$\sum_{r \in R_{\tau}^T} Y_{i r t}^R \leq Y_{i t t}^{I-T} \cdot bigM \quad \forall i, \tau, t \quad (5-124)$$

$$\sum_i Y_{i t t}^{I-T} \leq Y_{\tau t}^T \cdot bigM \quad \forall \tau, t \quad (5-125)$$

$$\sum_i Y_{i r t}^R \leq Y_{\tau r t}^{T-R} \cdot bigM \quad \forall \tau, r, t \quad (5-126)$$

Falls Operationen für eine Komponente auf einem Transportsystem durchgeführt werden sollen, muss das entsprechende Transportsystem für diese Komponente auf mindestens einer Route aktiviert werden (5-127).

$$\sum_{o \in O_{it}^{EX}} Y_{i o t t}^{O^{EX-T}} + \sum_{o \in O_{it}^{NEX}} X_{i o t t}^{O^{NEX-T}} \leq \sum_r Y_{i r t}^R \cdot bigM \quad \forall i, \tau, t \quad (5-127)$$

Manche Operationen können nur ausgeführt werden, wenn ein oder mehrere andere Operationen dem gleichen Transportsystem zugeordnet sind. In den Restriktionen (5-128)-(5-131) wird dies für jede Kombination aus exklusiven und nicht exklusiven Operationen für Lager- und Transportsysteme sichergestellt.

$$Y_{i \hat{o} t t}^{O^{EX-T}} = Y_{i o t t}^{O^{EX-T}} \quad \forall i, t, \tau, o \in O_i^{EX}, \hat{o} \in \{O_i^{EX} \cap O_o^{Zus}\} \quad (5-128)$$

$$Y_{i \hat{o} t t}^{O^{EX-T}} \cdot bigM \geq X_{i o t t}^{O^{NEX-T}} \quad \forall i, t, \tau, o \in O_i^{NEX}, \hat{o} \in \{O_i^{EX} \cap O_o^{Zus}\} \quad (5-129)$$

$$X_{i \hat{o} t t}^{O^{NEX-T}} \geq d_{i o \hat{o}}^{Zus-EX} \cdot Y_{i o t t}^{O^{EX-T}} \quad \forall i, t, \tau, o \in O_i^{EX}, \hat{o} \in \{O_i^{NEX} \cap O_o^{Zus}\} \quad (5-130)$$

$$X_{i \hat{o} t t}^{O^{NEX-T}} \geq d_{i o \hat{o}}^{Zus-NEX} \cdot X_{i o t t}^{O^{EX-T}} \quad \forall i, t, \tau, o \in O_i^{NEX}, \hat{o} \in \{O_i^{NEX} \cap O_o^{Zus}\} \quad (5-131)$$

Ein Transport muss auf Kanten erfolgen, die im Modell Lagersystemauswahl aktiviert wurden (5-132).

$$\sum_{\tau, r \in R_{\tau j j}^{Trans}} Y_{i r t}^R = z_{i j j t}^{Transp} \quad \forall t, i, \{(j, \hat{j}) | j < \hat{j}\} \quad (5-132)$$

In den Restriktionen (5-133)-(5-134) wird die Einhaltung der Kapazitätsbeschränkungen für Operationen sichergestellt. Dies erfolgt sowohl für exklusive (5-133) als auch für nicht exklusive (5-134) Operationen.

$$\sum_i Y_{i o t t}^{O^{EX-T}} \cdot d_{i o t}^{O^{EX}} \cdot k_{i o t}^{Bed-o-T} \leq k_{\tau o}^{T-o} \cdot Y_{\tau t}^T \quad \forall \tau, t, o \in O^{GEX} \quad (5-133)$$

$$\sum_i X_{iot}^{O^{NEX-T}} \cdot k_{iot}^{Bed-O-T} \leq k_{to}^{T-O} \cdot Y_{tt}^T \quad \forall \tau, t, o \in O^{GNEX} \quad (5-134)$$

Ebenso müssen die Kapazitätsbeschränkungen der externen Einrichtungen (für exklusive (5-136) und nicht exklusive (5-135) Operationen) und Lagersysteme (für exklusive (5-138) und nicht exklusive (5-137) Operationen) eingehalten werden.

$$\sum_i X_{iot}^{O^{NEX-Ext}} \leq k_o^{O-Ext} \quad \forall t, o \in O_t^{GNEX} \quad (5-135)$$

$$\sum_i Y_{iot}^{O^{EX-Ext}} \cdot d_{iot}^O \leq k_o^{O-Ext} \quad \forall t, o \in O_t^{GEX} \quad (5-136)$$

$$\sum_i X_{iot}^{O^{NEX-J-G}} \leq k_o^{J-O-G} \quad \forall t, o \in O_t^{GNEX} \quad (5-137)$$

$$\sum_i Y_{iot}^{O^{EX-J-G}} \cdot d_{iot}^{O^{EX}} \leq k_o^{J-O-G} \quad \forall t, o \in O_t^{GEX} \quad (5-138)$$

Auch auf den Routen muss die Kapazitätsbeschränkung als maximaler Durchfluss eingehalten werden.

$$\sum_i Y_{irt}^R \cdot d_{it} \leq k_{tr}^{T-R} \cdot Y_{trt}^{T-R} \quad \forall t, \tau \in T^{US}, r \in R_{tr}^T \quad (5-139)$$

Bei den unstetigen Transportsystemen muss neben dem maximalen Durchsatz auch die Kapazität der Transportmittel betrachtet werden. In (5-140) wird die Anzahl der notwendigen Transportmittel berechnet. Dabei muss die Gesamtkapazität der Transportmittel ausreichen um alle Transportfahrten inkl. Leerfahrten und Bearbeitungsaufwand und alle dem Transportsystem zugewiesenen Operationen durchzuführen. In (5-141) wird sichergestellt, dass die Anzahl der Transportmittel eine bestimmte Höchstgrenze nicht überschreitet.

$$\sum_{r \in R_{tr}^T, i} Y_{irt}^R \cdot d_{it} \cdot \frac{k_i^{Bed-I}}{k_{tr}^{T-US}} \cdot (u_{tr}^{Leerf} \cdot t_{tr}^{Fahrz} + t_{tr}^{Bearb}) + \sum_{i, o \in O_{it}^{NEX}} X_{io\tau}^{O^{NEX-T}} \cdot t_{to}^{T-O} \cdot k_{io\tau}^{Bed-O-T} + \quad (5-140)$$

$$\sum_{i, o \in O_{it}^{EX}} Y_{io\tau}^{O^{EX-T}} \cdot d_{io\tau}^{O^{EX}} \cdot t_{to}^{T-O} \cdot k_{io\tau}^{Bed-O-T} \leq X_{it}^{TM} \cdot t_{tr}^{T-US} \quad \forall t, \tau \in T_{tr}^{US}$$

$$X_{it}^{TM} \leq d_{tr}^{Tmax} \quad \forall t, \tau \in T_{tr}^{US} \quad (5-141)$$

Wird eine Operation für eine Komponente auf einem Transportsystem durchgeführt, so muss diese Operation für das Transportsystem aktiviert werden (5-142)-(5-143).

$$\sum_i Y_{io\tau}^{O^{EX-T}} \leq Y_{tot}^{O-T} \cdot bigM \quad \forall t, \tau, o \in O_t^{GEX} \quad (5-142)$$

$$\sum_i X_{io\tau\tau}^{O^{NEX-T}} \leq Y_{\tau\tau}^{O-T} \cdot bigM \quad \forall t, \tau, o \in O_t^{GNEX} \quad (5-143)$$

Abschließend stellt Restriktion (5-144) sicher, dass Lager, die im Betrachtungszeitraum genutzt werden, auch eröffnet werden. Gleiches gilt für die Einrichtungen zur Durchführung von Operationen (5-145) und die genutzten Routen (5-146). Die Anzahl neu zu beschaffender Transportmittel wird mit Hilfe der Gleichung (5-147) berechnet.

$$Y_{\tau\tau}^T - Y_{\tau\tau-1}^T \leq Y_{\tau\tau}^{T-Neu} \quad \forall t, \tau \quad (5-144)$$

$$Y_{\tau\tau}^{O-T} - Y_{\tau\tau-1}^{O-T} \leq Y_{\tau\tau}^{O-T-Neu} \quad \forall t, \tau, o \quad (5-145)$$

$$Y_{\tau\tau}^{T-R} - Y_{\tau\tau-1}^{T-R} \leq Y_{\tau\tau}^{T-R-Neu} \quad \forall t, \tau, r \quad (5-146)$$

$$X_{\tau\tau}^{TM} - X_{\tau\tau-1}^{TM} \leq X_{\tau\tau}^{TM-Neu} \quad \forall t, \tau \quad (5-147)$$

5.2 Hierarchisches Vorgehen

In diesem Abschnitt wird ein hierarchisches Vorgehen vorgestellt, das die zuvor beschriebenen Modelle und Verfahren in ein Gesamtverfahren zur Bewertung von unterschiedlichen Gleichteilestrategien integriert. Dabei wird zuerst ein Top-Down Vorgehen beschrieben, in dem die einzelnen Modelle und Verfahren nacheinander gelöst werden. Anschließend werden Rückkopplungen aufgezeigt, bei denen die erneute Anwendung bereits gelöster Modelle sinnvoll ist.

5.2.1 Top-Down Vorgehen

Abbildung 5-5 zeigt die Reihenfolge, in der die oben beschriebenen Modelle und Verfahren gelöst werden. Im Folgenden wird beschrieben, wie die Ergebnisse der Modell/Verfahren in die nachfolgenden Modelle/Verfahren einfließen. Außerdem wird aufgezeigt, welche Teile der Zielfunktionen in die Bewertung der Gleichteilestrategien einfließen.

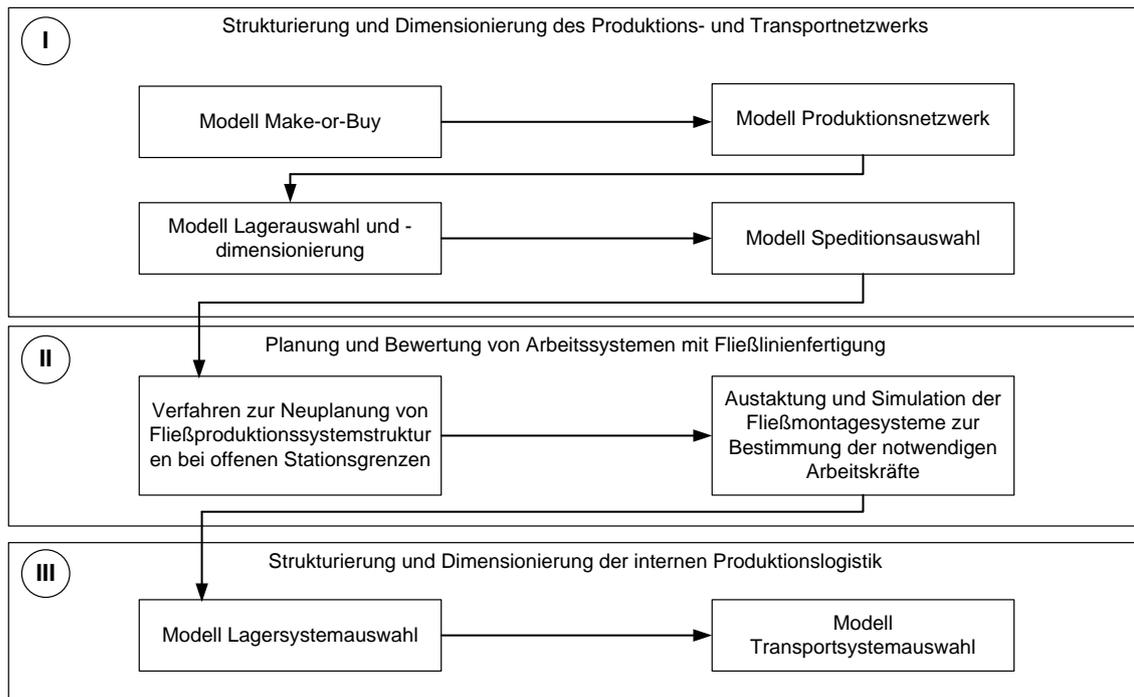


Abbildung 5-5: Schematische Darstellung des hierarchischen Vorgehens

5.2.1.1 Vorgehen zur Strukturierung- und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks

Lösung des „Modells für die Make-or-Buy Entscheidung und die Auswahl der Zulieferer“

Für mögliche zuzukaufende Komponenten muss der Bedarf bestimmt werden. Der Bedarf einer Komponente ergibt sich aus der Nachfrage nach Endprodukten und der Erzeugnisstruktur und kann mit Hilfe eines iterativen Vorgehens ermittelt werden¹¹³. Außerdem ist für jede Komponente die Mindest- bzw. Maximalanzahl möglicher Zulieferer festzulegen. Es werden mögliche Zulieferer je Komponente mit ihren Einmal- und Fixkosten für die Lösung des Modells benötigt. Können Rahmenverträge mit Zulieferern abgeschlossen werden, so sind mögliche Vertragslaufzeiten und die minimalen und maximalen Bestellmengen je Periode dem Modell zu übergeben. Je Zulieferer fließen mögliche Rabattstufen mit den jeweiligen variablen Kosten und den Mindestbestellmengen in das Modell ein. Für die Eigenproduktion von Komponenten werden „interne Zulieferer“ im Modell angelegt. Die Kosten für diese „Zulieferer“ werden lediglich abgeschätzt und im nachfolgenden Modell genau bestimmt. Zusätzlich sind noch die Transportkosten zu bestimmen, wofür bereits zu diesem Zeitpunkt antizipiert werden muss, wo die unterschiedlichen Komponenten verbaut werden sollen.

¹¹³ Mit Hilfe der Nachfrage nach Endprodukten sowie dem Stücklistenfaktor kann die Menge an notwendigen Bauteilen des letzten Fertigungsschritts ermittelt werden. Bestehen diese Bauteile wiederum aus Bauteilen, so kann jetzt hierfür der Bedarf bestimmt werden usw.

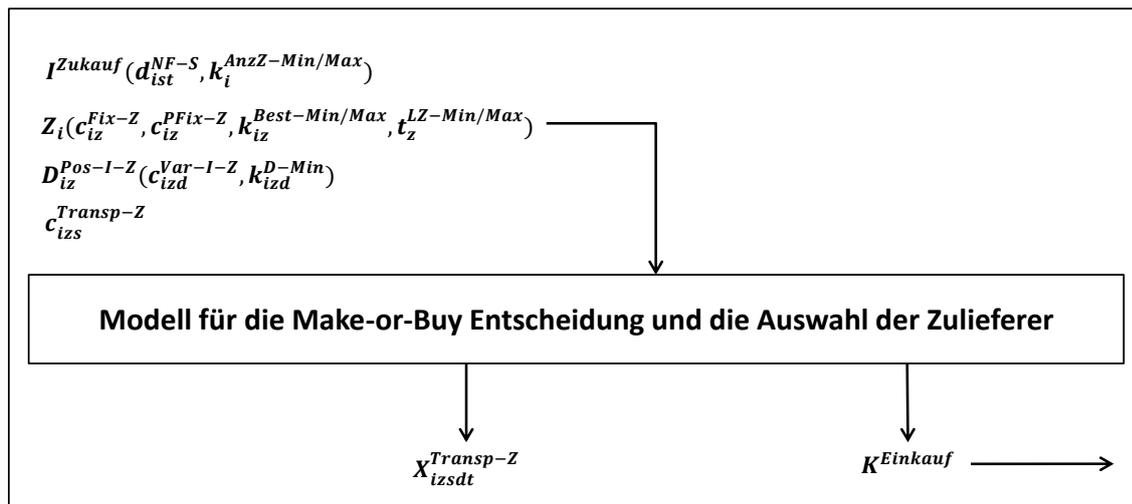


Abbildung 5-6: Input und Output für das „Modell für die Make-or-Buy Entscheidung und die Auswahl der Zulieferer“

Als Ergebnis liefert das Modell die Einkaufskosten, die in die Bewertung der untersuchten Gleichteilestrategie einfließen (5-148). Diese Kosten ergeben sich aus den Einmal-, den Fix- und den variablen Kosten für alle „externen Zulieferer“ des Modells. Die Information, welche Komponenten in welcher Menge von welchem Zulieferer bezogen werden, fließt in die folgenden Modelle ein.

$$K^{Einkauf} = \sum_t q_t \cdot \left[\sum_{i,z \in Z^{Ext},s,d} c_{izd}^{Var-I-Z} \cdot X_{izsdt}^{Transp-Z} + \sum_{z \in Z^{Ext},t} (c_z^{EK-Z} \cdot Y_{zt}^{Z-Neu} + c_z^{Fix-Z} \cdot Y_{zt}^Z) \right] \quad (5-148)$$

Lösung des „Modells zur Auswahl der Produktionskonzepte und zur Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen“

In diesem Modell werden die Komponenten, die im Modell „Make-or-Buy“ den internen Zulieferern zugeordnet wurden, und die Komponenten, deren Fertigung außerhalb des Unternehmens nicht in Betracht gezogen wurde, verwendet (5-149).

$$I^{PNW} = \left\{ i \left| \sum_{t,s,d,z \notin Z^{Ext}} X_{izsdt}^{Transp-Z} > 0 \right. \right\} + I^{Eigen} \quad (5-149)$$

Außerdem sind Produktionsstandorten inkl. der dort befindlichen Arbeitssysteme zu bestimmen. Für jedes Arbeitssystem sind mögliche Produktionskonzepte inkl. Kapazitäten und Kosten je Kapazitätsstufe zuzuordnen. Zusätzlich dazu werden die Kosten für einen Wechsel der Kapazitätsstufen, der Kapazitätsbedarf je Produkt und Produktionskonzept, die Menge an zu fertigenden Produkten je Produktionskonzept und die initiale

Belegung von Arbeitssystemen mit Produktionskonzepten (inkl. Kapazitätsstufe) zur Lösung des Modells benötigt. Für jedes Produktionskonzept muss festgelegt werden, wie hoch die Rüst- und Losanlaufverluste bei der Zuordnung einer neuen Komponente zu diesem Produktionskonzept sind. Im Modell wird außerdem die Nachfrage nach Endprodukten benötigt. Daneben sind die Transportkosten abzuschätzen, sowohl zwischen den Arbeitssystemen als auch von den Arbeitssystemen zu den Märkten. Um die Transportkosten von den Zulieferern zu den Arbeitssystemen mit zu berücksichtigen, können Zulieferer als Arbeitssysteme mit je einem Produktionskonzept und einer Kapazitätsstufe abgebildet werden. Die entsprechenden Produktionsvariablen sind dann im Vorfeld auf die im vorherigen Modell ermittelten Einkaufsmengen zu fixieren (5-150). Die im vorherigen Modell verwendeten Transportkosten sollten dabei zu den in diesem Modell verwendeten Transportkosten entsprechen (5-151).

$$\sum_{s,d} X_{izsdt}^{Transp-Z} = X_{ilpn=1t}^{ProdD} \quad \forall i \in I^{Zukauf}, (l, p) \hat{=} z, t \quad (5-150)$$

$$c_{izs}^{Transp-Z} = c_{ill}^{Transp-P} \quad \forall i \in I^{Zukauf}, l \hat{=} z, \hat{l} \hat{=} s \quad (5-151)$$

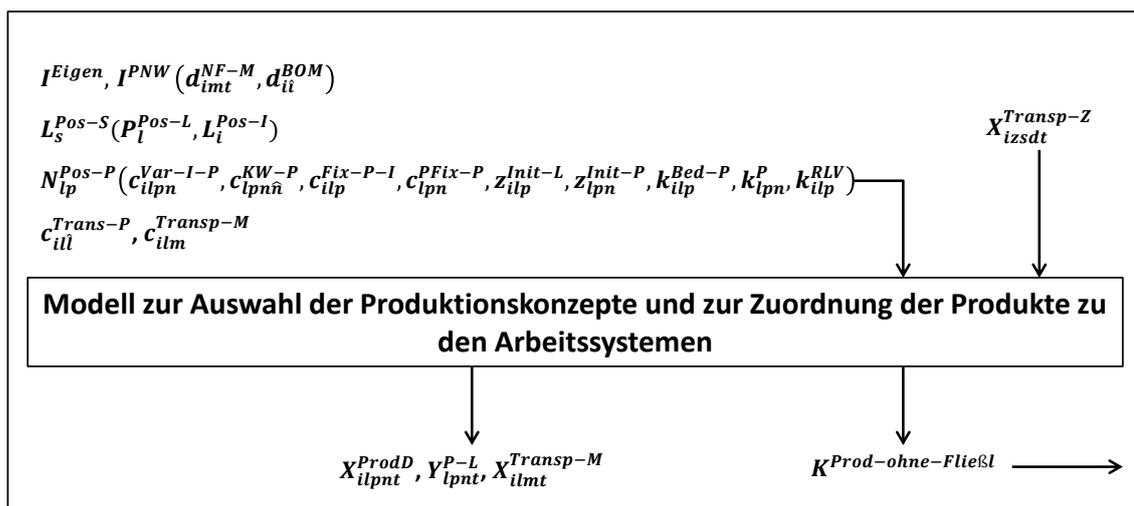


Abbildung 5-7: Input und Output für das „Modell zur Auswahl der Produktionskonzepte und zur Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen“

Die Produktionskosten je Arbeitssystem, bestehend aus Einmal-, Fix und variablen Kosten, fließen in die Bewertung der Gleichteilestrategien ein (5-152). Eine Ausnahme bilden die Arbeitssysteme mit Fließlinienfertigung. Die Kosten hierfür werden in den Verfahren „Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung“ ermittelt.

$K^{Prod-ohne-Fließl}$

$$\begin{aligned}
 &= q_t \cdot \left[\sum_{i,l \in L^{FL,p,n}} c_{ilpn}^{Var-I-P} \cdot X_{ilpnt}^{ProdD} \right. \\
 &+ \sum_{l \in L^{FL,p,n,\hat{n}}} c_{lpn\hat{n}}^{KW-P} \cdot Y_{lpn\hat{n}}^{P-L-KW} + \sum_{i,l \in L^{FL,p}} c_{ilp}^{EK-I-P} \cdot Y_{ilpt}^{P-KW} \quad (5-152) \\
 &\left. + \sum_{l \in L^{FL,p,n}} c_{lpn}^{Fix-P} \cdot Y_{lpnt}^{P-L} \right]
 \end{aligned}$$

Das gewählte Produktionskonzept je Arbeitssystem und die dort gewählte Kapazitätsstufe je Periode, die Menge an produzierten Produkten je Arbeitssystem auf dem jeweiligen Produktionskonzept in der jeweiligen Kapazitätsstufe je Periode und die Menge an Produkten, die vom jeweiligen Arbeitssystem zum jeweiligen Markt transportiert werden, werden an die nachfolgenden Modelle und Verfahren übergeben.

Lösung des „Modells zur Lagerauswahl und –dimensionierung, zur Zuordnung von Operationen und zur Festlegung der Flussmengen“

Die Ergebnisse der Modelle „Make-or-Buy“ und „Produktionsnetzwerk“ liefern den Komponentenbedarf und das dazugehörige Komponentenangebot für dieses Modell. Der Bedarf an Komponente i ergibt sich aus der Menge der zu produzierenden Komponenten \hat{l} multipliziert mit dem dazugehörigen Stücklistenfaktor (5-153). Die Menge an Komponenten, die in das Netzwerk hineinfließen ist entweder die Menge an produzierten Komponenten, die an anderen Standorten weiterverbaut werden, oder die Menge an Zukaufkomponenten (5-154). Für die Planung des Distributionsnetzwerks ist der Komponentenbedarf gleich der Nachfrage nach Endprodukten (5-155). Die Menge der zur Verfügung stehenden Komponenten im Distributionsnetzwerk entspricht der Menge an produzierten Endprodukte (5-156). Falls Zulieferer- und das Distributionsnetzwerk ein einem Modell gelöst werden sollen, gelten alle vier Gleichungen.

$$d_{ist}^{NF-S} = \sum_{i,p,n} d_{ii}^{BOM} \cdot X_{ilpnt}^{ProdD} \quad \forall i, t, s \hat{=} l \quad (5-153)$$

$$d_{izt}^{I-Z} = \begin{cases} \sum_{l=z,p,n} X_{ilpnt}^{ProdD}, \text{ falls } i \in I^{Eigen} \vee \sum_i d_{ii}^{BOM} > 0 \\ \sum_{d,s} X_{izsdt}^{Transp-Z}, \text{ falls } i \in I^{Zukauf} \end{cases} \quad \forall i, z, t \quad (5-154)$$

$$d_{ist}^{NF-S} = d_{imt}^{NF-M} \quad \forall i, t, s \hat{=} m \quad (5-155)$$

$$d_{izt}^{I-Z} = \sum_m X_{ilmt}^{Transp-M} \quad \forall i, t, z \hat{=} l \quad (5-156)$$

Die Kapitalbindungskosten für eine Komponente können über den durchschnittlichen Wert der Komponente multipliziert mit dem kalkulatorischen Zinssatz für Eigen- und Fremdkapital berechnet werden. Der durchschnittliche Wert einer Komponente berechnet sich entweder aus dem durchschnittlichen Einkaufspreis (5-157) oder dem durchschnittlichen Produktionspreis (5-158). Je Arbeitssystem ist außerdem die Höhe des benötigten Sicherheitsbestandes festzulegen.

$$c_i^{KKB} = \frac{\sum_{z,d,t} X_{izsd}^{Transp-Z} \cdot c_{izd}^{Var-I-Z}}{\sum_{z,d,t} X_{izsd}^{Transp-Z}} \cdot i \quad \forall i \in I^{Zukauf} \quad (5-157)$$

$$c_i^{KKB} = \frac{\sum_{l,p,n,t} c_{ilpn}^{Var-I-P} \cdot X_{ilpnt}^{ProdD}}{\sum_{l,p,n,t} X_{ilpnt}^{ProdD}} \cdot i \quad \forall i \notin I^{Zukauf} \quad (5-158)$$

Des Weiteren werden mögliche bzw. bestehende Standorte für Lager benötigt. Mögliche Lager bei Zulieferern und innerhalb von Produktionsstandorten müssen hierbei auch abgebildet werden. Es kann im Vorfeld festgelegt werden, wie viele Lager minimal oder maximal genutzt werden sollen. Für jedes Lager sind die variablen Lagerkosten zu bestimmen¹¹⁴. Außerdem wird je Lager ein Parameter bestimmt, der angibt, wie viel Prozent der im schlechtesten Fall maximal gleichzeitig ankommenden Menge an Komponenten als Kapazität zur Verfügung stehen muss¹¹⁵. Falls es für bestimmte Lager mehrere Kapazitätsstufen gibt, so müssen hierfür die Kapazitäten, die periodisch anfallenden Kosten und die Wechselkosten bestimmt werden.

Für alle Operationen sind Lager zu identifizieren, in denen die Operationen durchzuführen können. Für diese Lager sind Einmal-, Fix- und variablen Kosten, sowie Kapazitäten für die Durchführung der Operationen zu bestimmen. Die Transportkosten auf den einzelnen Kanten werden abgeschätzt und im nachfolgenden Modell näher bestimmt.

Die Lagerkosten fließen in die Bewertung des betrachteten Gleichteilegrads ein. Diese Kosten bestehen aus allen Teilen der Zielfunktion des Modells außer den Transportkosten¹¹⁶. Dabei werden jedoch nur Lager $j \in J^{ZL}$, deren Kosten bei der Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik nicht genauer bestimmt werden, betrachtet¹¹⁷. Die Transportmengen je Kante und die genutzten Lager inkl. der dort installierten Operationen werden an die nachfolgenden Modelle übergeben.

¹¹⁴ Diese variablen Lagerkosten fallen beim Ein-, Um- oder Auslagern der Komponenten an und beinhalten nicht die Kapitalbindungskosten.

¹¹⁵ Durch eine operative Optimierung der Bestellmengen kann die notwendige Kapazität eines Lagers minimiert werden.

¹¹⁶ siehe hierfür Kapitel 5.1.1.3.

¹¹⁷ hauptsächlich Lager, die von externen Dienstleistern oder den Zulieferern betrieben werden und Zwischenlager zwischen Zulieferern und Produktionsstandorten

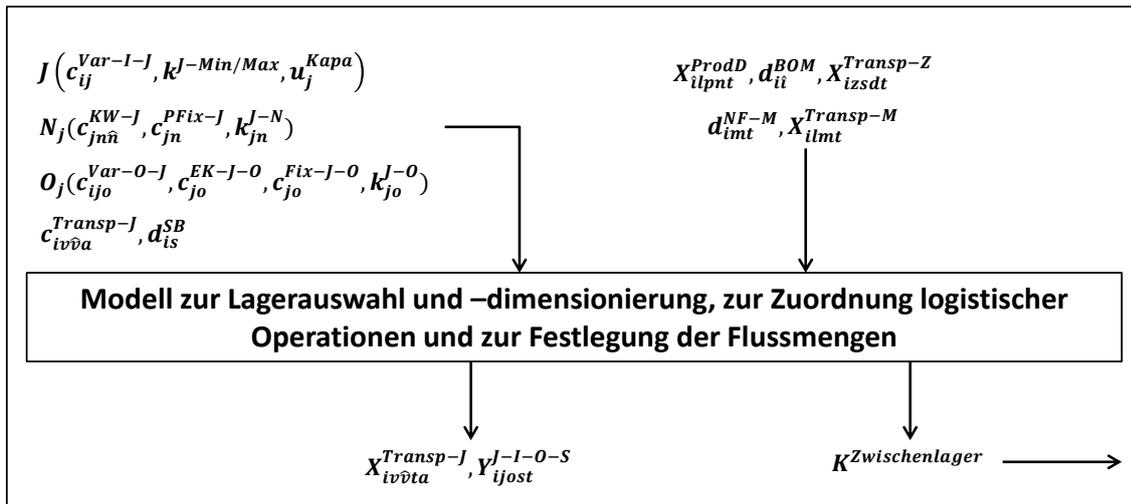


Abbildung 5-8: Input und Output für das Modell „Lagerauswahl und -dimensionierung“

Lösung des „Modells zur Speditionsauswahl“

Zur Lösung des Modells werden die Transportmengen je Kante benötigt (5-159). Die Kapazität der Lagerstandorte ergibt sich aus der gewählten Kapazitätsstufe abzüglich des Sicherheitsbestands dividiert durch den Lagernutzungsfaktor (5-159). Außerdem werden die Kapitalbindungskosten aus dem Modell „Lagerauswahl“ übernommen.

$$d_{iv\hat{v}at}^{Transp-T} = \sum_a X_{iv\hat{v}at}^{Transp-J} \quad \forall i, v, \hat{v}, t \quad (5-159)$$

$$k_{\hat{v}t}^V = \frac{1}{u_j^{Kapa}} \cdot \left(\sum_n k_{jn}^{J-N} \cdot Y_{jnt}^{J-N} - \sum_{i,s} X_{ijst}^{SB} \cdot k_i^{Bed-I} \right) \quad \forall \hat{v} = j, t \quad (5-160)$$

Es sind mögliche Spediteure zu identifizieren, für die Einmal-, Fix- und variable Kosten zu bestimmen sind. Für Spediteure können verschiedenen Ausbaustufen mit unterschiedlichen Kapazitäten und unterschiedlichen Einmal- und Fixkosten abgebildet werden. Es muss festgelegt werden, welche Kanten ein Spediteur bedienen kann. Für einen eigenen Fuhrpark sind mögliche Transportmittel mit Einmal- und Fixkosten und Kapazitäten zu ermitteln. Stehen bei einem Spediteur mehrere Transportmittel zur Auswahl, so kann dies über unterschiedliche Spediteure abgebildet werden. Der Kapazitätsbedarf der Komponenten bei jeder möglichen Transportfrequenz ist ebenfalls zu übergeben.

Das Modell liefert die Transportkosten auf allen Kanten des Netzwerks. Die Kosten entsprechen dabei der Zielfunktion des Modells¹¹⁸. Die hier getroffenen Entscheidungen fließen nicht in die weiteren Modelle und Verfahren ein.

¹¹⁸ siehe hierzu Kapitel 5.1.1.4

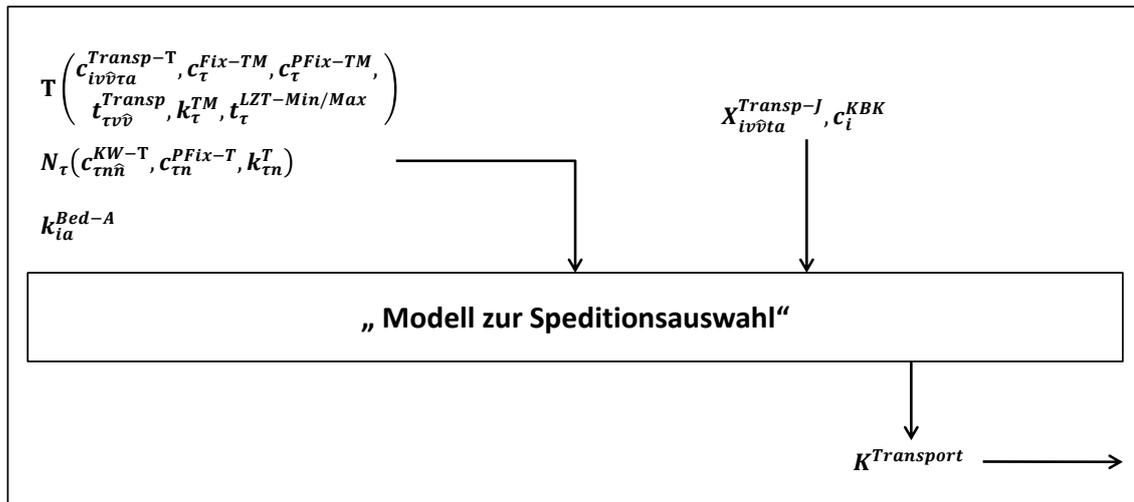


Abbildung 5-9: Input und Output für das Modell „Speditionsauswahl“

5.2.1.2 Vorgehen zur Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung

Anwendung des Verfahrens zur Neuplanung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen

Das Verfahren von Gans [Gan09] wird für jedes Arbeitssystem mit Fließlinienfertigung angewendet. Dabei werden die zu produzierenden Produkte und die zur Verfügung stehenden Ressourcen benötigt. Die zu produzierenden Produkte ergeben sich aus der Lösung des Modells „Produktionsnetzwerk“ (5-161). Da sich in unterschiedlichen Perioden unterschiedliche Mengen an zu produzierenden Produkten ergeben können, sollte das Verfahren in jeder Periode durchgeführt werden.

$$z_{ilt}^L = \sum_{p,n} X_{ilpnt}^{ProdD} \quad \forall i, l, t \quad (5-161)$$

Für die Durchführung des Verfahrens ist ein Plan-Produktionsprogramm notwendig. Das Vorgehen hierzu ist in Kapitel 5.1.2.1 beschrieben. Außerdem ist dem Verfahren die Menge notwendiger Ressourcen für die zu produzierenden Produktvarianten zu übergeben.

Als Ergebnis liefert das Verfahren die benötigten Ressourcen für jedes Arbeitssystem mit Fließlinienfertigung¹¹⁹ und die dazugehörigen Kosten, bestehend aus Einmal- und Fixkosten (5-162). Die Verteilung der Produktvarianten der auf die unterschiedlichen Fließlinien wird an das Verfahren „Austaktung und Simulation der Fließmontagesysteme zur Bestimmung der notwendigen Arbeitskräfte“ übergeben.

¹¹⁹ Benötigt ein Produkt mit einer bestimmten Ausprägung eines Differenzierungsmerkmals eine bestimmte technische Ressource, so wird die Ressource an allen Linien benötigt, der das Produkt mit der Ausprägung zugewiesen ist.

$$K_l^{Anl-MLinie} = q_t \cdot \sum_t \left[\sum_{\zeta, \rho} c_{\rho}^{Fix-P} \cdot X_{\zeta \rho t}^{Z-P} + \sum_{\zeta, \rho} c_{\rho}^{EK-P} \cdot X_{\zeta \rho t}^{Z-P-Neu} \right] \quad (5-162)$$

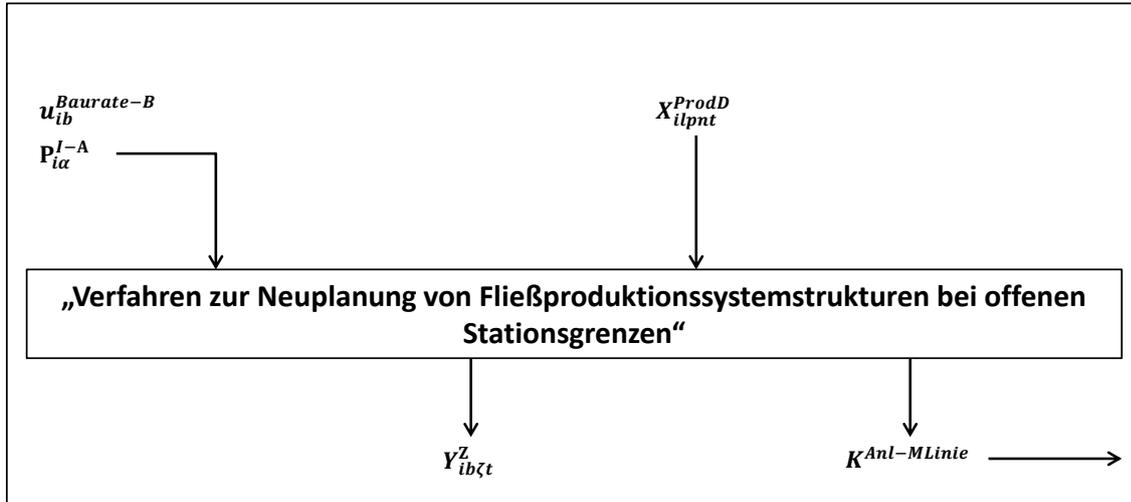


Abbildung 5-10: Input und Output für das Verfahren „Neuplanung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen“

Anwendung der Austaktung und Simulation der Fließmontagesysteme zur Bestimmung der notwendigen Arbeitskräfte

Das Verfahren von Altemeier [Alt09] baut direkt auf den Ergebnissen des Verfahrens von Gans auf. Jede Produktionslinie mit allen ihr zugewiesenen Aufträgen des Plan-Produktionsprogramms bildet die Grundlage für das Verfahren. Daneben werden die benötigten Ressourcen übergeben um eine möglichst gültige Austaktung zu erreichen und Zuordnungen von Arbeitsvorgängen zu Arbeitsplätzen ohne entsprechende Ausstattung zu vermeiden.

Als Ergebnis liefert das Verfahren die Kosten für die notwendigen Arbeitskräfte je Produktionslinie. Das Ergebnis der Austaktung wird an die Planung der internen Logistik übergeben.

$$K_l^{AK-MLinie} = d_l^{SP-L} \cdot c_{q=SP}^{Q-T} + d_l^{BA-L} \cdot c_{q=BA}^{Q-T} \quad (5-163)$$

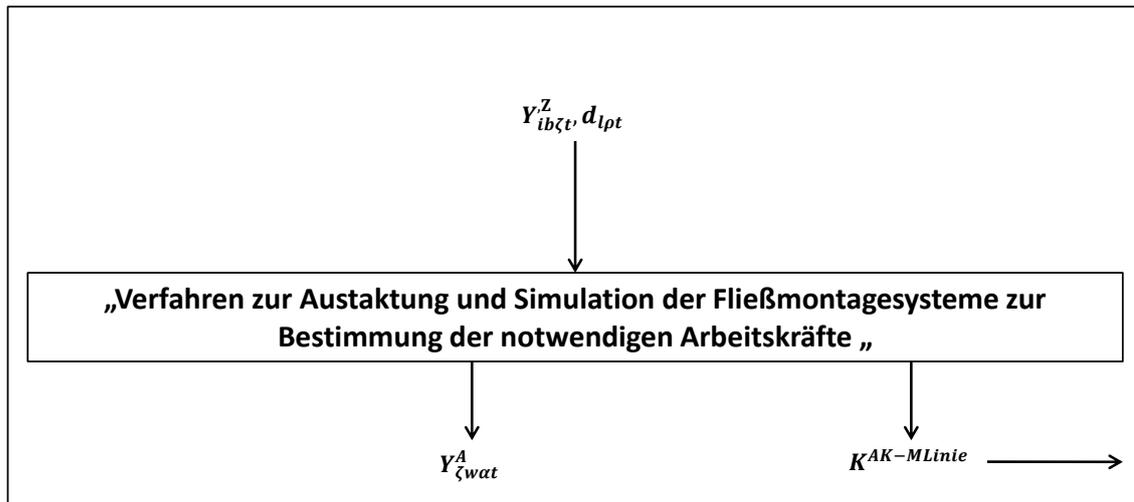


Abbildung 5-11: Input und Output für das Verfahren „Austaktung und Simulation der Fließmontagesysteme zur Bestimmung der notwendigen Arbeitskräfte“

5.2.1.3 Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik

Das Modell ist für jeden Produktionsstandort oder, je nach Menge der betrachteten Komponenten, für jede Produktionshalle anzuwenden. Voraussetzung ist die Erstellung von verschiedenen Layoutalternativen, die dann jeweils bewertet werden. Anschließend ist das Layout mit den geringsten Logistikkosten zu übernehmen.

Lösung des Modells „Lagersystemauswahl“

Im betrachteten Logistiksystem müssen mögliche Lagersysteme erstellt und den unterschiedlichen Planungsebenen zugewiesen werden. In den Wareneingängen ist die Operation $o = \text{Quelle}$ und in den Warenausgängen sowie an den Materialandienflächen der Arbeitssysteme die Operation $o = \text{Senke}$ durchzuführen. Für jedes Lager können unterschiedliche Alternativen erstellt werden, von denen lediglich eine gewählt werden darf. Die im Modell „Lagerauswahl“ dem Standort zugewiesenen Operationen und Operationen, deren Durchführung nur am Standort erfolgen kann, sind in diesem Modell zuzuordnen (5-164). Die Anzahl der Durchführungen jeder Operation ergibt sich aus der Menge der dem Arbeitssystem zugewiesenen Komponenten je Periode (5-165) oder muss, falls die Operation nicht für alle Komponenten erforderlich ist, festgelegt werden. Bei den Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung sind die Komponenten, die für die am Arbeitsplatz befindlichen AVos benötigt werden, anzuliefern (5-167). Die Menge an Produkten, die gelagert werden müssen kann aus der Menge der benötigten Komponenten und der Anlieferfrequenz je Periode berechnet werden (5-168). Für alle Lagersysteme sind Einmal- und Fixkosten für die Errichtung und den Betrieb des Systems und für die Einrichtung von technischen Anlagen für die Durchführung von Operationen und

variable Kosten zu bestimmen. Des Weiteren sind die Kapazitäten der Lagersysteme hinsichtlich der Operationen zu ermitteln.

$$O_{ist}^{I-L} = \left\{ o \mid \sum_{j \in J_s^{S,o}} Y_{ijost}^{I-J-O} = 1 \right\} + O_{is}^{I-S} \quad (5-164)$$

$$d_{iot}^{OEX/NEX} = \sum_{l \in L_s^{LogSys}, p, n, \hat{i}} d_{il}^{BOM} \cdot X_{ilpnt}^{ProdD} \quad \forall i \notin I_s^{Out}, t, o \in O_{ist}^{I-L} \quad (5-165)$$

$$d_{iot}^{OEX/NEX} = \sum_{l \in L_s^{LogSys}, p, n} X_{ilpnt}^{ProdD} \quad \forall i \in I_s^{Out}, t, o \in O_{ist}^{I-L} \quad (5-166)$$

$$Y_{io=Senke, j}^{OEX-J} = Y_{\zeta wat}^A \quad \forall \alpha, \zeta \in Z_l^L, t, i \in I_\alpha^A, w = j \quad (5-167)$$

$$d_{iot}^{OEX} = \sum_{\tau, a, v, \hat{v} \in L_s^{LogSys}} \frac{X_{iv\hat{v}\tau a}^{SP}}{d_a^{AnzL}} \quad \forall i, t, o = \text{Lagern} \quad (5-168)$$

Ferner sind mögliche Transportrouten und die dazugehörigen Kosten, sowohl für den Transport als auch für die Durchführung von Operationen zu bestimmen. Es ist möglich, bestimmte Operationen, trotz der Entscheidung diese intern durchzuführen, an externe Lager oder Dienstleister zu vergeben. Für diese Operationen sind Kapazitäten und Kosten zu ermitteln.

Als Ergebnis liefert das Modell die Kosten für die Lagersysteme des internen Logistiksystems. Diese Kosten entsprechen der Zielfunktion des Modells jedoch ohne die Transportkosten¹²⁰. Die Entscheidung über die Nutzung der Kanten im internen Logistiknetzwerk je Komponente wird ebenso an das Modell „Transportsystemauswahl“ übergeben wie die Zuordnung von exklusiven und nicht exklusiven Operationen zu Transportsystemen.

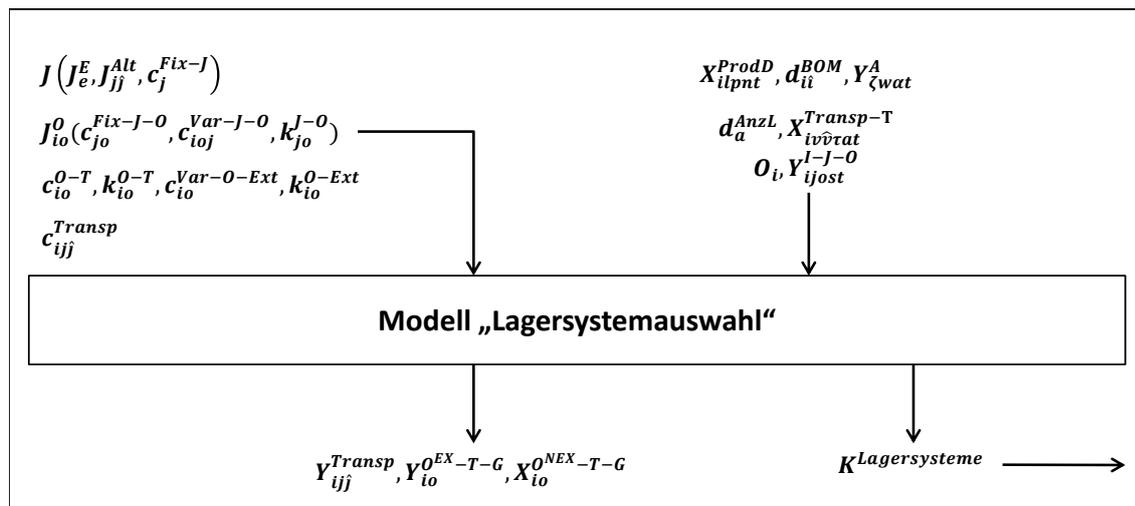


Abbildung 5-12: Input und Output für das Modell „Lagersystemauswahl“

¹²⁰ siehe hierzu Kapitel 5.1.3.1

Lösung des Modells „Transportsystemauswahl“

Es sind Routen zu erstellen, die den Transport auf den gewählten Kanten des Modells „Lagersystemauswahl“ ermöglichen (5-169). Je Route sind Kosten und Kapazitäten zu bestimmen. Für die Berechnung der notwendigen Transportmittel bei unstetigen Transportsystemen müssen für jede Route die Fahrzeit, die Transportkapazität eines Transportmittels und der prozentuale Anteil an Leerfahrzeit an der Betriebszeit bereitgestellt werden. Wie bei den Transportsystemen besteht die Möglichkeit sich gegenseitig ausschließende Routen festzulegen.

Für Operationen, die im vorhergehenden Modell den Transportsystemen zugeordnet wurden, sind Transportsysteme zu definieren, die diese Operationen durchführen können (5-170)-(5-171). Für die Transportsysteme sind die Kapazitäten und die Kosten, sowohl für die Transportsysteme als auch für die Durchführung von Operationen auf diesen Transportsystemen, dem Modell zu übergeben. Sind in den gewählten Lagersystemen noch Kapazitäten für Operationen vorhanden, so müssen hierfür die Kosten und die Kapazitäten bestimmt werden. Das Gleiche gilt für die mögliche Fremdvergabe von logistischen Operationen.

$$Y_{ijj}^{Transp} = Z_{ijj}^{Transp} \quad \forall \{(i, j, j) | Y_{ijj}^{Transp} = 1\} \quad (5-169)$$

$$O_i^{EX} = \{o | Y_{io}^{O^{EX}-T-G} = 1\} \quad \forall i \quad (5-170)$$

$$O_i^{NEX} = \{o | X_{io}^{O^{NEX}-T-G} > 1\} \quad \forall i \quad (5-171)$$

Aus dem Modell „Lagersystemauswahl“ können die Kosten und Kapazitäten für die Durchführung von Operationen auf Lagersystemen oder bei externen Dienstleistern bestimmt werden. Die Kapazität für Operationen auf Lagersystemen ergibt sich dabei aus der noch vorhandenen Restkapazität auf den gewählten Lagersystemen. Die Kosten entsprechen den durchschnittlichen Kosten für die Durchführung von Operationen auf den Lagersystemen.

Als Ergebnis liefert das Modell die Kosten für den Transport der Komponenten im internen Logistiksystem, die dann in die Bewertung des betrachteten Gleichteilegrads einfließen. Diese Kosten ergeben sich direkt aus der Zielfunktion des Modells¹²¹.

¹²¹ siehe hierzu Kapitel 5.1.3.2

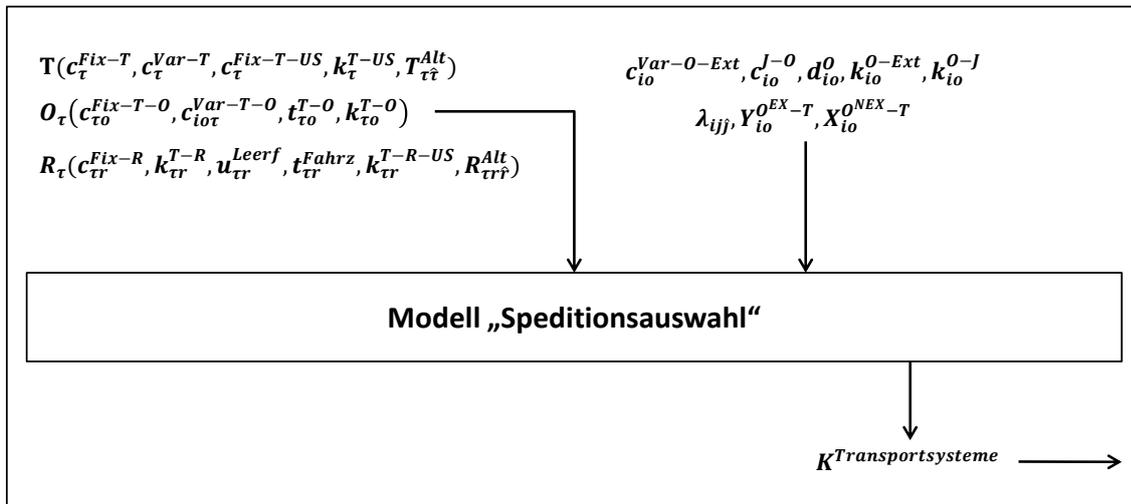


Abbildung 5-13: Input und Output für das Modell „Transportsystemauswahl“

5.2.1.4 Bestimmung der Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik für eine Gleichteilestrategie

Nachdem die Modelle und Verfahren für eine Gleichteilestrategie angewendet wurden, können die Gesamtkosten der Gleichteilestrategie für den Planungszeitraum bestimmt werden. Diese setzen sich aus der Summe der Kosten zusammen, die aus den Modellen bzw. Verfahren abgeleitet wurden.

$$\begin{aligned}
 K^{GTS} = & K^{Einkauf} + K^{Prod-ohne-Flie\beta l} + K^{Zwischenlager} + K^{Transport} \\
 & + \sum_{\zeta} (K^{Anl-MLinie} + K^{AK-MLinie}) \\
 & + \sum_s (K^{Lagersysteme} + K^{Transportssysteme})
 \end{aligned} \tag{5-172}$$

5.2.2 Rückkopplungen

Für das hierarchische Planungsmodell wurden sechs mögliche Rückkopplungen identifiziert. *Abbildung 5-14* zeigt zwischen welchen Modellen diese Rückkopplungen notwendig sein können. Im Folgenden wird für jede Rückkopplung beschrieben, welche Anpassungen der Eingabeparameter für die nochmalig zu berechnenden Modelle notwendig sind. Die Notwendigkeit einer Neuberechnung ergibt sich für alle Rückkopplungen aus der Differenz zwischen den approximierten Kosten in den vorgelagerten Modellen und den genauen Kosten der nachfolgenden Modelle. Wann genau eine Rückkopplung durchgeführt werden sollte, muss im konkreten Anwendungsfall vom Anwender entschieden werden.

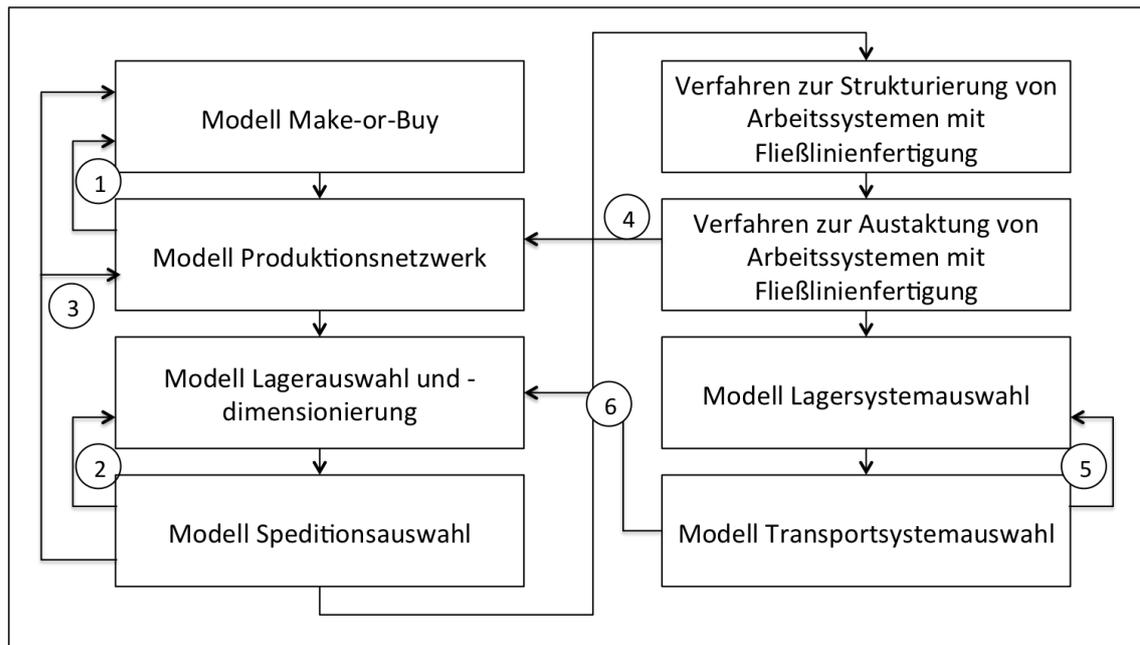


Abbildung 5-14: Mögliche Rückkopplung im hierarchischen Planungsmodell

Rückkopplung 1: Modell Produktionsnetzwerk → Modell Make-or-Buy

Im Modell „Make-or-Buy“ wird von einer bestimmten Nachfrage an unterschiedlichen Produktionsstandorten ausgegangen. Die geplante Zuordnung der verschiedenen Zwischen- und Endprodukte zu den Produktionsstandorten kann sich aufgrund der Optimierung des Modells „Produktionsnetzwerk“ verändern. Dadurch ändert sich auch der Bedarf an Komponenten an den Standorten, was zu einer veränderten Entscheidung führen kann, welche Produkte bei welchen Zulieferern zugekauft werden sollen. Ein zweiter Grund für die Durchführung der Rückkopplung sind stark veränderte Kosten für die eigene Produktion von Komponenten.

Bei einer Anwendung der Rückkopplung muss die Nachfrage an Komponenten und die Kosten für interne Lieferanten aktualisiert werden. Der Bedarf einer Komponente an einem Standort berechnet sich durch die produzierte Menge an Zwischen- und Endprodukten, die die entsprechende Komponente benötigen, und dem Stücklistenfaktor (5-173).

$$d_{ist}^{NF-S} = \sum_{j, l \in L_s^S} d_{ij}^{BOM} \cdot X_{ilt}^{Prod} \quad \forall i, s, t \quad (5-173)$$

Die Einmal- und die Fixkosten für eine Komponente bei einem internen Lieferanten berechnen sich aus den anteiligen Einmal- und Fixkosten für alle Produktionskonzepte, die zur Herstellung der Komponente genutzt werden (5-174), (5-175). Die variablen Kosten entsprechen den durchschnittlichen variablen Kosten im Modell „Produktionsnetzwerk“ (5-176). Die Transportkosten können entweder direkt übernommen werden

oder müssen für den Transport zu weiteren Produktionsstandorten neu abgeschätzt werden.

$$c_{iz}^{EK-Z} = \sum_{(l,p)X_{ilt}^{Prod} > 0, n, \hat{n}, t} c_{lpn\hat{n}}^{KW-P} \cdot Y_{lpn\hat{n}t}^{P-L-KW} \cdot u_{ip}^{I-P-EK} + \sum_{l,p,t} c_{ilp}^{EK-I-P} \cdot Y_{ilpt}^{P-KW} \quad \forall i, z \in Z^{Intern} \quad (5-174)$$

$$c_{iz}^{Fix-Z} = \frac{1}{|T|} \cdot \sum_{(l,p)X_{ilt}^{Prod} > 0, n, t} c_{lpn}^{Fix-P} \cdot Y_{lpnt}^{P-L} \cdot u_{ip}^{I-P-Fix} \quad \forall i, z \in Z^{Intern} \quad (5-175)$$

$$c_{izd=1}^{Var-I-Z} = \frac{1}{\sum_{l,t} X_{ilt}^{Prod}} \sum_{l,p,n} c_{ilpn}^{Var-I-P} \cdot X_{ilpnt}^{ProdD} \quad \forall i, z \in Z^{Intern} \quad (5-176)$$

Rückkopplung 2: Modell Speditionsauswahl → Modell Lagerauswahl und dimensionierung

Für eine optimale Auswahl und Dimensionierung von Zwischenlagern sind die Transportkosten von zentraler Bedeutung. Wird nach der Auswahl der Speditionen festgestellt, dass die geplanten Transportkosten auf den Kanten des Netzwerks im Modell „Lagerauswahl“ deutlich von den tatsächlichen Kosten abweichen, kann eine Neuplanung der Zwischenlager notwendig werden. Bei der Durchführung der Rückkopplung ändern sich im Modell „Lagerauswahl“ lediglich die Transportkosten. Diese berechnen sich aus den durchschnittlichen variablen Transportkosten auf der Kante und den Kapitalbindungskosten (5-177) sowie den anteiligen Kosten für interne (5-178) und externe (5-179) Speditionen.

$$c_{iv\hat{v}a}^{Transp-J-Var} = \frac{1}{\sum_{t,\tau} X_{iv\hat{v}\tau a}^{Transp-T}} \cdot \sum_{t,\tau \in T_{iv\hat{v}}^{Kante-T}} \left(X_{iv\hat{v}\tau a}^{Transp-T} \cdot c_{iv\hat{v}\tau a}^{Transp-T} + X_{iv\hat{v}\tau a}^{Transp-T} \cdot c_i^{KKB} \cdot \frac{t_{\tau v\hat{v}}^{Transp}}{d_a^{AnzL} \cdot 2 \cdot t^{Periode}} \right) \quad \forall i, v, \hat{v}, a \quad (5-177)$$

$$c_{iv\hat{v}a}^{Transp-J-IS} = \sum_{t,\tau \in T^{Eigen} \cup T_{iv\hat{v}}^{Kante-T}} u_{iv\hat{v}\tau}^{Kante-T} \cdot (c_{\tau}^{EK-TM} \cdot X_{\tau t}^{TM-Neu} + X_{\tau t}^{TM} \cdot c_{\tau}^{Fix-TM}) \quad \forall i, v, \hat{v}, a \quad (5-178)$$

$$c_{iv\hat{v}a}^{Transp-J-ES} = \sum_{t,\tau \in T^{Eigen} \cup T_{iv\hat{v}}^{Kante-T}, n} u_{iv\hat{v}\tau}^{Kante-T} \cdot \left(c_{\tau n}^{Fix-T} \cdot Y_{\tau nt}^{T-N} + \sum_{\hat{n}} Y_{\tau n\hat{n}t}^{T-KW} \cdot c_{\tau n\hat{n}}^{KW-T} \right) \quad \forall i, v, \hat{v}, a \quad (5-179)$$

$$c_{iv\hat{v}a}^{Transp-J} = c_{iv\hat{v}a}^{Transp-J-Var} + c_{iv\hat{v}a}^{Transp-J-IS} + c_{iv\hat{v}a}^{Transp-J-ES} \quad (5-180)$$

Die beschriebene Formel dient lediglich zur Berechnung der Transportkosten der genutzten Transportfrequenz. Die Transportkosten auf der Kante bei anderen Frequenzen sollten ebenfalls angepasst werden. Dabei können wieder die gleichen Formeln genutzt werden, es muss jedoch die Belegung der Variable $X^{Transp-T}$ auf die jeweilige Transportfrequenz gesetzt werden.

Rückkopplung 3: Modell Speditionsauswahl → Modell Make-or-Buy und Modell Produktionsnetzwerk

Wird nach der Berechnung des Modells zur Speditionsauswahl festgestellt, dass die prognostizierten Transportkosten zu stark von den tatsächlichen Transportkosten abweichen, so sollte eine Rückkopplung zum Modell „Make-or-Buy“ bzw. zum Modell „Produktionsnetzwerk“ durchgeführt werden. Die Transportkosten ergeben sich dabei aus der Summe der Kosten für Speditionen und Lager. Die Speditionskosten je Kante können über die Formel (5-180) bestimmt werden. Die Kosten einer Komponente in einem Lager setzen sich aus den durchschnittlichen Kapitalbindungskosten der Komponente (5-181), den Lagerkosten (5-182) und den Operationskosten (5-183) zusammen. Die Kapitalbindungskosten berechnen sich aus den durchschnittlich am Lagerstandort befindlichen Komponenten und den am Standort befindlichen Sicherheitsbeständen multipliziert mit dem Kapitalbindungskostensatz. Die Lagerkosten können durch die durchschnittlichen variablen Lagerkosten und den anteiligen Einmal- sowie Fixkosten für das Lager berechnet werden. Gleiches gilt für die Berechnung der Operationskosten bestehend aus variablen Operationskosten und anteiligen Einmal- und Fixkosten für die installierte Operation.

$$c_{ij}^{I-J-KBK} = \frac{1}{\sum_{t,v,a} X_{ivjat}^{Transp-J}} \cdot \sum_{v,a,t} \frac{X_{ivjat}^{Transp-J}}{2 \cdot d_a^{AnzL}} \cdot c_i^{KBK} \cdot z_j^{J-KBK} + \sum_{s,t} X_{ijst}^{SB} \cdot c_i^{KBK} \cdot z_j^{J-KBK} \quad \forall i,j \quad (5-181)$$

$$c_{ij}^{I-J-LK} = \frac{1}{\sum_{t,v,a} X_{ivjat}^{Transp-J}} \cdot \sum_{v,a,t} X_{ivjat}^{Transp-J} \cdot c_{ij}^{Var-I-J} + u_{ij}^{I-J} \cdot \sum_{t,n} \left(\sum_{\hat{n}>n} Y_{jn\hat{n}t}^{J-KW} \cdot c_{jn\hat{n}}^{KW-J} + Y_{jnt}^{J-N} \cdot c_{jn}^{Fix-J} \right) \quad \forall i,j \quad (5-182)$$

$$c_{ij}^{I-J-OK} = \frac{1}{\sum_{t,v,a} X_{ivjat}^{Transp-J}} \cdot \sum_{t,s,o} X_{ijost}^{J-I-O-S} \cdot c_{ijo}^{Var-O-J} + u_{ij}^{I-J-O} \cdot \sum_{t,o} \left(Y_{jot}^{J-O-Neu} \cdot c_{jo}^{EK-J-O} + Y_{jot}^{J-O} \cdot c_{jo}^{Fix-J-O} \right) \quad \forall i,j \quad (5-183)$$

$$c_{ij}^{I-J} = c_{ij}^{I-J-KBK} + c_{ij}^{I-J-LK} + c_{ij}^{I-J-OK} \quad (5-184)$$

Für die Neuberechnung der Transportkosten müssen für jede Komponente alle Transportwege zwischen Zulieferern, Produktionsstandorten und Märkten identifiziert werden. Die Transportkosten für einen dieser Transportwege ergeben sich aus der Summe der durchschnittlichen Kantenkosten sowie der durchschnittlichen Lagerkosten auf dem Weg. Werden unterschiedliche Wege im Laufe des Betrachtungszeitraums für eine Kante der ersten beiden Modelle genutzt, so ist ein Mittelwert über die unterschiedlichen Wege zu bilden.

Rückkopplung 4: Verfahren zur Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung → Modell Produktionsnetzwerk

Sollten die prognostizierten Kosten für ein Arbeitssystem mit Fließlinienfertigung nicht den Kosten entsprechen, die durch die Methoden in Kapitel 5.1.2 bestimmt werden, so kann eine erneute Berechnung des Modells „Produktionsnetzwerk“ sinnvoll sein. Die Fixkosten für das Arbeitssystem ergeben sich aus den Personalkosten im Arbeitssystem plus den Fixkosten für die genutzten technischen Anlagen (5-185). Die Kapazitätswechselkosten entsprechen der Summe der Einmalkosten aller genutzten technischen Anlagen (5-186). Die Einmalkosten werden komplett den Kapazitätswechselkosten zugerechnet, da eine Zuordnung der Kosten zu einzelnen Produkten oder Komponenten in der Regel nicht möglich ist.

$$c_{lp,n=0,\hat{n}=1}^{KW-P} = \sum_{\zeta,\rho} c_{\rho}^{EK-P} \cdot X_{\zeta\rho t}^{Z-P-Neu} \quad (5-185)$$

$$c_{lp,n=1}^{Fix-P} = d_l^{SP-L} \cdot c_{q=SP}^{Q-T} + d_l^{BA-L} \cdot c_{q=BA}^{Q-T} + \sum_{\zeta,\rho} c_{\rho}^{Fix-P} \cdot X_{\zeta\rho t}^{Z-P} \quad (5-186)$$

Rückkopplung 5: Modell Transportsystemauswahl → Modell Lagersystemauswahl

Für eine optimale Auswahl und Dimensionierung der Lagersysteme sind korrekte Transportkosten notwendig. Diese Kosten sind Ergebnis der Transportsystemauswahl und können daher beim Modell zur Lagersystemauswahl nur abgeschätzt werden. Sollte diese Abschätzung zu stark von den tatsächlichen Transportkosten abweichen, sollte das Modell zur Lagersystemauswahl mit den aktualisierten Kosten neu gelöst werden. Außerdem werden im Modell Lagersystemauswahl die Kosten für Operationsdurchführungen in Transportsystemen abgeschätzt. Weichen diese Abschätzungen zu stark von den tatsächlichen Kosten ab, kann ebenfalls eine Neuberechnung des Modells Lagersystemauswahl notwendig werden.

Die Neuberechnung der Transportkosten erfolgt ähnlich der Berechnung der Kosten des externen Transportnetzwerkmodells. Diese ergeben sich aus den durchschnittlichen variablen Transportkosten auf der Kante (5-187) sowie den anteiligen Einmal- (5-188) und

Fixkosten (5-189) der genutzten Transportsysteme und Routen. Zusätzlich dazu müssen die Operationskosten für Transportsysteme berechnet werden. Diese Kosten bestehen aus den anteiligen Einmal und Fixkosten und den durchschnittlichen Transportkosten. (5-191) und (5-192) zeigen die Berechnung der Operationskosten für exklusive und nicht exklusive Operationen.

$$c_{ijj}^{Transp-Var} = \frac{1}{\sum_t d_{it}} \cdot \sum_{t,\tau,r \in R_{jj}^{Kante}} Y_{itrt}^R \cdot d_{it} \cdot c_{\tau}^{Var-T} \quad \forall i, j, \hat{j} \quad (5-187)$$

$$c_{ijj}^{Transp-EK} = \sum_{t,\tau} \left(u_{it}^{I-T} \cdot Y_{\tau t}^{T-Neu} \cdot c_{\tau}^{EK-T} + \sum_r u_{itrr}^{I-R} \cdot Y_{trt}^{T-R-Neu} \cdot c_{\tau r}^{EK-R} \right) + \sum_{\tau \in T_{\tau}^{US}} u_{it}^{I-T} \cdot X_{\tau t}^{TM-Neu} \cdot c_{\tau}^{EK-T-US} \quad \forall i, j, \hat{j} \quad (5-188)$$

$$c_{ijj}^{Transp-FK} = \sum_{t,\tau} \left(u_{it}^{I-T} \cdot Y_{\tau t}^T \cdot c_{\tau}^{FK-T} + \sum_r u_{itrr}^{I-R} \cdot Y_{trt}^{T-R} \cdot c_{\tau r}^{Fix-R} \right) + \sum_{t,\tau \in T_{\tau}^{US}} u_{it}^{I-T} \cdot X_{\tau t}^{TM} \cdot c_{\tau}^{FK-T-US} \quad \forall i, j, \hat{j} \quad (5-189)$$

$$c_{ijj}^{Transp} = c_{ijj}^{Transp-Var} + c_{ijj}^{Transp-EK} + c_{ijj}^{Transp-FK} \quad (5-190)$$

$$c_{io}^{Var-T-O-G} = \sum_{\tau,t} u_{io}^{I-O} \cdot (Y_{\tau ot}^{O-T-Neu} \cdot c_{\tau o}^{EK-T-O} + Y_{\tau ot}^{O-T} \cdot c_{\tau o}^{Fix-T-O}) + \frac{1}{\sum_t d_{iot}^{OEX}} \cdot \sum_{\tau,t} Y_{iot\tau}^{OEX-T} \cdot d_{iot}^{OEX} \cdot c_{io\tau}^{Var-T-O} \quad \forall i, o \in O^{EX} \quad (5-191)$$

$$c_{io}^{Var-T-O-G} = \sum_{\tau,t} u_{io}^{I-O} \cdot (Y_{\tau ot}^{O-T-Neu} \cdot c_{\tau o}^{EK-T-O} + Y_{\tau ot}^{O-T} \cdot c_{\tau o}^{Fix-T-O}) + \frac{1}{\sum_t d_{iot}^{ONEX}} \cdot \sum_{\tau,t} X_{iot\tau}^{ONEX-T} \cdot c_{io\tau}^{Var-T-O} \quad \forall i, o \in O^{NEX} \quad (5-192)$$

Rückkopplung 6: Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik → Modell Lagerauswahl

Die Auswahl von Lagern erfolgt anhand der Kosten für die Lagerstandorte sowie der Transportkosten. Durch die Modelle zur Bestimmung der optimalen internen Produktionslogistik werden die Kosten für einige Lagerstandorte genauer bestimmt. Bei zu starken Abweichungen zwischen den approximierten und den genauen Kosten eines oder mehrerer Lagerstandorte, sollte das Modell zur Lagerauswahl neu gelöst werden.

Die Kalkulation der variablen Lagerkosten erfolgt durch Addition der durchschnittlichen variablen Kantenkosten sowie der durchschnittlichen variablen Lagerkosten (5-193). Zur Berechnung der Kapazitätswechselkosten von der inaktiven Kapazitätsstu-

fe 0 zu der Kapazitätsstufe, die im letzten Durchlauf des Modells „Lagerauswahl“ gewählt wurde, werden alle Einmalkosten für Transport- und Lagersysteme des Lagerstandorts aufsummiert (5-194). Gleiches gilt für die Berechnung der Fixkosten des Standorts (5-195). Die durchschnittlichen Operationskosten werden wie bei den Transportsystemen¹²² berechnet, sowohl für die exklusiven (5-196) als auch für die nicht exklusiven (5-197) Operationen. Die Operationskosten für das Modell zur Lagerauswahl ergeben sich aus der Summe der durchschnittlichen Operationskosten auf Lager- und auf Transportsystemen (5-198).

$$c_{ij}^{Var-I-J} = \sum_{j\bar{j}} c_{ij\bar{j}}^{Transp} + \frac{1}{\sum_t d_{it}} \cdot \sum_{t,j} X_{iojt}^{O^{NEX}} \cdot c_{ioj}^{Var-J-O} \quad (5-193)$$

$\forall i, j, o = \text{Lagern}$

$$c_{j,0,n}^{KW-J} = \sum_{t,\bar{j}} \left(Y_{jot}^{J-O-Neu} \cdot c_{jo}^{EK-J-O} + Y_{jt}^{J-Neu} \cdot c_j^{EK-J} \right) + \sum_{t,\tau} \left(Y_{tt}^{T-Neu} \cdot c_{\tau}^{EK-T} + \sum_r Y_{trt}^{T-R-Neu} \cdot c_{tr}^{EK-R} \right) + \sum_{\tau \in T_{\tau}^{US}} X_{tt}^{TM-Neu} \cdot c_{\tau}^{EK-T-US} \quad (5-194)$$

$\forall i, j = \text{internes Lager}, n = \text{Kapastufe letzter Durchlauf}, o = \text{Lagern}$

$$c_{jn}^{Fix-J} = \sum_{j,t} \left(Y_{jot}^{J-O} \cdot c_{jo}^{FK-J-O} + Y_{jt}^J \cdot c_j^{FK-J} \right) + \sum_{t,\tau} \left(Y_{tt}^T \cdot c_{\tau}^{FK-T} + \sum_r Y_{trt}^{T-R} \cdot c_{tr}^{Fix-R} \right) + \sum_{t,\tau \in T_{\tau}^{US}} X_{tt}^{TM} \cdot c_{\tau}^{FK-T-US} \quad (5-195)$$

$\forall i, j = \text{internes Lager}, n = \text{Kapastufe letzter Durchlauf}, o = \text{Lagern}$

$$c_{io}^{Var-J-O-G} = \sum_{j,t} u_{io}^{I-O} \cdot \left(Y_{jot}^{O-J-Neu} \cdot c_{jo}^{EK-J-O} + Y_{jot}^{O-J} \cdot c_{jo}^{Fix-J-O} \right) + \frac{1}{\sum_t d_{iot}^{O^{EX}}} \cdot \sum_{j,t} Y_{iojt}^{O^{EX-J}} \cdot d_{iot}^{O^{EX}} \cdot c_{ioj}^{Var-J-O} \quad \forall i, o \in O^{EX} \quad (5-196)$$

$$c_{io}^{Var-J-O-G} = \sum_{j,t} u_{io}^{I-O} \cdot \left(Y_{jot}^{O-J-Neu} \cdot c_{jo}^{EK-J-O} + Y_{jot}^{O-J} \cdot c_{jo}^{Fix-J-O} \right) + \frac{1}{\sum_t d_{iot}^{O^{NEX}}} \cdot \sum_{\tau,t} X_{iojt}^{O^{NEX-J}} \cdot c_{ioj}^{Var-J-O} \quad \forall i, o \in O^{NEX} \quad (5-197)$$

$$c_{ijo}^{Var-O-J} = c_{io}^{Var-J-O-G} + c_{io}^{Var-T-O-G} \quad \forall j = \text{internes Lager} \quad (5-198)$$

¹²² siehe Formeln (5-191) und (5-192)

6 Evaluation des Planungsmodells

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Modelle und Verfahren evaluiert und auf ihre Eignung zur Bewertung unterschiedlicher Gleichteilestrategien untersucht. Hierzu wird ein Planungsszenario für ein Unternehmen mit variantenreicher Serienfertigung entworfen, welches anschließend mit Hilfe der einzelnen Modelle und Verfahren bewertet wird. Für jedes Modell werden Auszüge der Eingangsdaten sowie der Ergebnisse präsentiert. Der kalkulatorische Zinssatz für alle Modelle beträgt 7%.

Die in Kapitel 5 beschriebenen Modelle wurden mit Hilfe der Modellierungssprache XPress-Mosel von der Firma FICO umgesetzt und mit dem XPress-Optimizer gelöst. Zur Verwaltung der Daten wurde für jedes Modell eine Access Datenbank der Firma Microsoft verwendet. Der verwendete Computer ist ein Intel Pentium Core 2 Duo (T7100) mit 1,8 GHz und 1 GB RAM.

6.1 Evaluation der Modelle zur Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks

6.1.1 Evaluation des Modells zur Make-or-Buy Entscheidung und zur Auswahl der Zulieferer

Im vorliegenden Beispiel wird eine kostenoptimale Zuordnung von 50 Zulieferern zu 30 Produkten gesucht. Für jedes der Produkte stehen dabei zwischen zwei und drei unterschiedliche Zulieferer zur Auswahl. Die Menge der Zulieferer gliedert sich in 40 externe und zehn interne Zulieferer. Die bei den Zulieferern gekauften bzw. hergestellten Produkte müssen zu fünf unterschiedlichen Produktionsstandorten transportiert werden. Der Betrachtungshorizont für das Beispiel beträgt sieben Perioden. Im Folgenden werden alle relevanten Eingabedaten für zehn exemplarische Komponenten und die dazugehörigen Zulieferer präsentiert.

In *Tabelle 6-1* werden alle möglichen Zulieferer für die zehn exemplarischen Komponenten aufgelistet. Für alle Komponenten stehen hierbei jeweils zwei externe Zulieferer zur Auswahl. Alle Komponenten, außer die Komponenten drei und acht, können alternativ auch selber produziert werden.

Komponente	Zulieferer 1	Zulieferer 2	Zulieferer 3
K1	E-1 (5)	E-26 (4)	I-1 (1,20)
K2	E-2 (10)	E-27 (8)	I-2 (2)
K3	E-3 (50)	E-28 (52)	-
K4	E-4 (25)	E-29 (24)	I-3 (21)
K5	E-5 (34)	E-30 (37)	I-4 (8)
K6	E-1 (5)	E-26 (6)	I-1 (1,70)
K7	E-2 (9)	E-27 (8)	I-2 (2,80)
K8	E-3(45)	E-28 (42)	-
K9	E-4 (23)	E-29 (25)	I-3 (20,5)
K10	E-5 (27)	E-30 (25)	I-4 (7)

Tabelle 6-1: Mögliche Lieferanten für ausgewählte Komponenten (Einkaufspreise in Klammern)

Tabelle 6-2 zeigt die Nachfrage nach den Komponenten getrennt nach Standorten als Summe über den gesamten Betrachtungszeitraum. Die Komponenten eins bis vier haben dabei eine identische Nachfrage. Ist die Nachfrage in Standorten für Komponenten null, so wird die Komponente nicht für die an diesem Standort zu fertigenden Produkte benötigt.

Komponente	Standort 1	Standort 2	Standort 3	Standort 4	Standort 5
K1 – K4	342.000	120.000	198.000	84.000	150.000
K5	300.000	300.000	246.000	72.000	114.000
K6	90.000	0	156.000	42.000	114.000
K7	72.000	0	0	54.000	60.000
K8	342.000	270.000	0	84.000	162.000
K9	90.000	120.000	90.000	0	0
K10	522.000	270.000	108.000	114.000	252.000

Tabelle 6-2: Nachfragemenge für ausgewählte Komponenten (Summe über alle Perioden)

Alle betrachteten externen Zulieferer sind in der Lage jeweils den kompletten Bedarf an Komponenten herzustellen. Für die externen Zulieferer 4 und 26 fallen im Gegensatz zu den anderen externen Zulieferern aufgrund der Nutzung des Betreibermodells deutlich höhere Kosten für die Anschaffung und Betrieb der Produktionsmittel an. Die Einmalkosten des internen Zulieferers I-3, der ebenfalls die Komponenten K4 und K9 herstellen kann, ist hier niedriger als bei den externen Zulieferern, da sich bereits einige der benötigten Betriebsmittel an den Produktionsstandorten befinden. Dafür fallen erhöhte Fixkosten an.

Zulieferer	Kapazität	Einmalkosten	Fixkosten	Rabattstufen
E-1	alle Komp.	1.000	5.000	3
E-2	alle Komp.	1.000	5.000	3
E-3	alle Komp.	1.000	5.000	3
E-4	alle Komp.	10.000.000	900.000	3
E-5	alle Komp.	1.000	5.000	3
E-26	alle Komp.	1.000	5.000	3
E-27	alle Komp.	1.000	5.000	3
E-28	alle Komp.	1.000	5.000	3
E-29	alle Komp.	10.000.000	900.000	3
E-30	alle Komp.	1.000	5.000	3
I-1	150.000	800.000	200.000	1
I-2	200.000	1.000.000	500.000	1
I-3	150.000	5.000.000	1.000.000	1
I-4	180.000	15.000.000	2.000.000	1

Tabelle 6-3: Kosten, Rabattstufen und Kapazitäten der Zulieferer

Alle Zulieferer bieten ein Rabattsystem mit drei Stufen an. Hierbei müssen in Stufe eins 100%, in Stufe zwei 90% und in Stufe drei 80% der variablen Kosten gezahlt werden. Die Mindestbestellmenge zur Nutzung einer Rabattstufe entspricht dabei für Stufe zwei 33% der maximal möglichen Einkaufsmenge und für Stufe drei 66%. Bei den internen Zulieferern ist hingegen nur eine Rabattstufe vorgesehen. Die konkreten Kosten und Kapazitäten können aus *Tabelle 6-3* entnommen werden.

Standort/ Zulieferer	Standort 1	Standort 2	Standort 3	Standort 4	Standort 5
E-1	1,20	0,15	1,80	0,20	0,10
E-26	2,20	1,90	2,40	1,40	3,50
I-1	0,01	0,40	1,90	2,10	1,80

Tabelle 6-4: Transportkosten für Komponente eins

Für alle betrachteten Komponenten gilt eine Beschränkung auf einen Zulieferer je Komponente. Nur die Komponenten 3, 4 und 9 dürfen auch bei mehreren Zulieferern bezogen werden. Eine Mindestanzahl für die Zahl der Zulieferer je Komponente gibt es für die betrachteten Komponenten nicht. Des Weiteren existiert keine Beschränkung der Vertragslaufzeiten mit den externen Zulieferern. Mindestbestellmengen wurden ebenfalls nicht vereinbart. Abschließend werden die Transportkosten für alle Kanten zwischen Zulieferern und Produktionsstandorten abgeschätzt. *Tabelle 6-4* zeigt exemplarisch die Transportkosten für Komponente 1.

Das zu lösende mathematische Modell besteht aus 6.718 Variablen und 5.071 Restriktionen. Die Lösungszeit betrug 2,1 Sekunden. *Tabelle 6-5* zeigt das Ergebnis der Optimierung für die zehn betrachteten Komponenten. Von diesen Komponenten werden sieben extern zugekauft und drei selbst hergestellt (von vier insgesamt). Die Gesamt-

kosten für den Testfall betragen 422 Mio. GE, wovon 374 Mio. GE für den Kauf bzw. die Herstellung der Komponenten und 48 Mio. GE für den Transport aufgewendet werden müssen. 297,8 Mio. GE betragen die Kosten für den Einkauf aller Komponenten von externen Lieferanten. Diese Kosten fließen in die Bewertung der Gleichteilestrategie ein, während die übrigen Kosten in den nachfolgenden Modellen genauer bestimmt werden.

Komponente	Zulieferer	Einkaufskosten	Transportkosten
K1	I-1	-	670.156
K2	E-27	4.695.526	1.506.744
K3	E-3	20.438.840	1.594.391
	E-28	9.217.728	509.634
K4	I-3	15.407.196	366.838
K5	E-5	23.036.442	4.090.366
K6	E-1	1.319.632	188.589
K7	E-27	976.921	178.248
K8	E-3	9.505.782	3.865.340
K9	I-3	-	123.100
K10	E-30	20.779.280	4.384.822

Tabelle 6-5: Ergebnis der Optimierung mit dem Modell „Make-or-Buy Entscheidung und Auswahl der Zulieferer“

6.1.2 Evaluation des Modells zur Auswahl der Produktionskonzepte und zur Zuordnung der Produkte zu den Arbeitssystemen

Die Ergebnisse des vorherigen Modells aufgreifend erfolgt die Verteilung der zu fertigenden Vor-, Zwischen und Endprodukte auf die Arbeitssysteme sowie die Auswahl der Produktionskonzepte. Hierbei werden neben den vier Komponenten, die für eine Eigenfertigung ausgewählt wurden, noch vier weitere selbst herzustellende Vorprodukte betrachtet. Fünf der Vorprodukte fließen direkt in die Endprodukte ein während die restlichen 29 Vorprodukte zu sechs Zwischenprodukten verbaut werden. Eine unterschiedliche Kombination aus Vor- und Zwischenprodukten ergibt eine Menge von sechs Endprodukten. *Tabelle 6-6* zeigt die Stücklistenstruktur der unterschiedlichen Produkte.

Komponente	benötigte Vorprodukte	benötigte Zwischenprodukte
EP1	K9, K26, K27, K30	ZP1, ZP2, ZP3
EP2	K8, K10, K28, K30	ZP4, ZP5, ZP6
EP3	K10, K26, K30	ZP1, ZP5, ZP6
EP4	K6, K27, K29, K30	ZP2, ZP3, ZP4
EP5	K7, K8, K10, K30	ZP1, ZP3, ZP5
EP6	K8, K10, K27, K30	ZP2, ZP4, ZP6
ZP1	K1 – K4, K31 – K34	-
ZP2	K5, K11 – K13, K31 – K34	-
ZP3	K14, K15, K31 – K34	-
ZP4	K16 – K19, K31 – K34	-
ZP5	K20 – K22, K31 – K34	-
ZP6	K23 – K25, K31 – K34	-

Tabelle 6-6: Stücklistenstruktur für End- (EP) und Zwischenprodukte (ZP)

Das betrachtete Produktionsnetzwerk besteht aus fünf Produktionsstandorten an denen jeweils ein Arbeitssystem zur Herstellung der End- sowie der Zwischenprodukte genutzt werden kann. Zusätzlich hierzu besteht die Möglichkeit einen zentralen Standort für die Herstellung der Zwischenprodukte zu nutzen. Es wurden zwei Arbeitssysteme ohne Standort modelliert, die die externen Zulieferer repräsentieren. Für jedes Arbeitssystem können zwei unterschiedlichen Produktionskonzepten gewählt werden. Jedes Produktionskonzept kann in drei unterschiedlichen Kapazitätsstufen betrieben werden.

Komponente	Markt 1	Markt 2	Markt 3
EP1	75.000	120.000	105.000
EP2	85.500	136.800	119.700
EP3	102.000	163.200	142.800
EP4	100.500	160.800	140.700
EP5	46.500	74.400	65.100
EP6	85.500	132.000	115.500

Tabelle 6-7: Nachfrage nach Endprodukten

Die hergestellten Endprodukte werden an drei unterschiedlichen Märkten nachgefragt. Tabelle 6-7 gibt die Summe der Nachfrage über alle Perioden getrennt nach Komponente und Standort an. In *Abbildung 6-1* wird der Verlauf der Nachfrage für Endprodukt 1 an Standort 1 dargestellt.

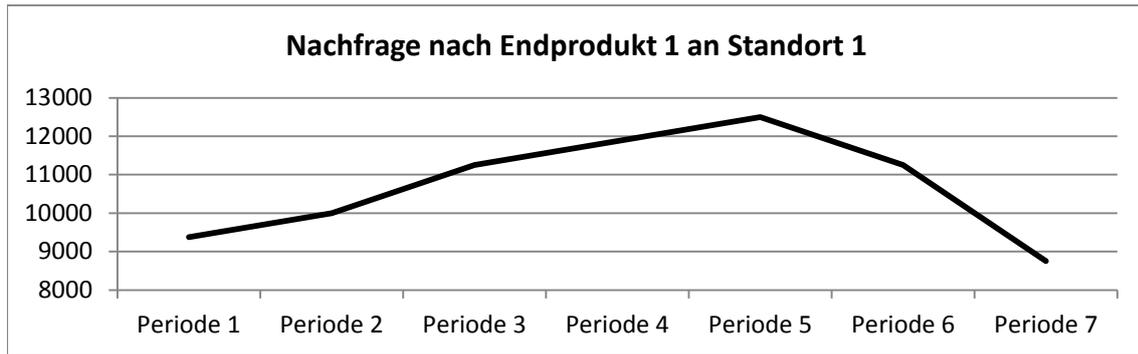


Abbildung 6-1: Nachfrage nach Endprodukten

Für jedes Arbeitssystem werden zwei Produktionskonzepte definiert. Das Produktionskonzept 1 stellt dabei ein überwiegend manuelles Konzept dar, das sich durch niedrige Einmalkosten und hohe Fixkosten auszeichnet. Produktionskonzept 2 verursacht hingegen hohe Einmal- und niedrige Fixkosten. Die Kapazität beider Produktionskonzepte ist identisch. Für jedes der Produktionskonzepte existieren drei Kapazitätstufen, zwischen denen während des Betrachtungszeitraums gewechselt werden kann. *Tabelle 6-8* zeigt exemplarisch die Kapazitäten und Kosten für die Produktionskonzepte für die Endprodukte an allen Standorten in der Kapazitätsstufe 1. Die Einmalkosten für die Produktionskonzepte 1 an den Standorten ist dabei 0, da das Konzept bereits an den Standorten installiert wurde.

PK	Kapazität	Einmalkosten	Fixkosten
PK1 Standort 1	51.266	0	899.411
PK2 Standort 1	51.266	5.126.600	532.061
PK1 Standort 2	51.301	0	976.244
PK2 Standort 2	51.301	5.130.100	564.461
PK1 Standort 3	52.232	0	1.171.393
PK2 Standort 3	52.232	5.223.200	550.090
PK1 Standort 4	51.920	0	1.060.834
PK2 Standort 4	51.920	5.192.000	512.157
PK1 Standort 5	52.995	0	842.055
PK2 Standort 5	52.995	5.299.500	347.322

Tabelle 6-8: Kapazitäten und Kosten für Produktionskonzepte zur Herstellung der Endprodukte in Kapazitätsstufe 1

Für alle Produkte werden variable Kosten, Rüstverluste durch die Zuordnung zu einem Produktionskonzept und der Kapazitätsbedarf festgelegt. *Tabelle 6-9* zeigt exemplarisch die Daten für die Endprodukte. Dabei ist zu sehen, dass Endprodukt 1 in Produktionskonzept 1 einen etwas niedrigeren und Endprodukt 4 einen etwas höheren Kapazitätsbedarf aufweist. Bei dem automatisierten Produktionskonzept 2 ist die Produktionszeit aller Endprodukte hingegen gleich. Außerdem sind die Rüstverluste im Produktionskonzept 2 deutlich niedriger als im Produktionskonzept 1.

PK	Produkt	Kapazitätsbedarf	variable Kosten	Rüstverluste
PK1	EP1	0,9	11,18	150
PK2	EP1	1	11,18	53
PK1	EP2	1	11,14	156
PK2	EP2	1	11,14	68
PK1	EP3	1	11,06	123
PK2	EP3	1	11,06	52
PK1	EP4	1,1	11,83	158
PK2	EP4	1	11,83	52
PK1	EP5	1	10,97	195
PK2	EP5	1	10,97	54
PK1	EP6	1	12,32	117
PK2	EP6	1	12,32	40

Tabelle 6-9: Kapazitätsbedarf, variable Kosten und Rüst- bzw. Losanlaufverluste

In Tabelle 6-10 sind die Kosten für die Zuordnung von Produkten zu Produktionskonzepten dargestellt. Diese Kosten sind für Produktionskonzept 2 einheitlich, während sie bei Produktionskonzept 1 nur bei bestimmten Produkten an bestimmten Standorten anfallen. Dies liegt darin begründet, dass diese Produktionskonzepte bereits für die Herstellung einiger Produkte ausgelegt sind.

PK	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	EP6
PK1 Standort 1	0	0	0	0	0	0
PK2 Standort 1	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
PK1 Standort 2	0	0	500.000	500.000	500.000	0
PK2 Standort 2	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
PK1 Standort 3	0	500.000	0	0	500.000	500.000
PK2 Standort 3	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
PK1 Standort 4	500.000	500.000	0	0	0	0
PK2 Standort 4	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
PK1 Standort 5	500.000	0	0	0	0	500.000
PK2 Standort 5	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000

Tabelle 6-10: Produktzuordnungskosten für Endprodukte

Die Transportkosten der zugekauften Komponenten zu den Produktionsstandorten entspricht den in 6.1.1 genutzten Transportkosten. Tabelle 6-11 beinhaltet die Transportkosten der Endprodukte zu den unterschiedlichen Absatzmärkten.

Standort	Markt 1	Markt 2	Markt 3
Standort 1	8,89	27,57	25,37
Standort 2	29,4	26,67	20,57
Standort 3	12,71	21,09	19,48
Standort 4	9,73	8,31	28,07
Standort 5	8,63	6,81	23,11

Tabelle 6-11: Exemplarische Distributionskosten für Endprodukte

Das zu lösende Modell besteht aus 32.743 Variablen und 12.714 Restriktionen. Die Lösungszeit beträgt 50 Minuten bei einem „MIP-GAP“ von 5%. *Tabelle 6-12* zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Dabei ist zu sehen, dass alle fünf Standorte genutzt wurden, jedoch das Arbeitssystem für die Zwischenkomponenten an Standort 2 geschlossen bleibt. Auch wird das Zwischenkomponentenwerk nicht eröffnet. Die Gesamtkosten des Modells belaufen sich auf 374,6 Mio. GE, wovon 284,5 Mio. GE Produktions- und 90,1 Mio. GE Transportkosten darstellen. Alle in diesem Beispiel verwendeten Arbeitssysteme sind nicht nach dem Fließprinzip angeordnet, weshalb die Produktionskosten direkt in die Bewertung der Gleichteilestrategie einfließen. Die Transportkosten werden in den nachfolgenden Modellen konkretisiert.

Standort	Genutzte PK	Prod. Produkte	Kosten
Standort 1	PK1 (EP), PK1 (ZP)	EP(1-6), ZP(1-6), VP(1-8)	49,7 Mio
Standort 2	PK1 (EP), - (ZP)	EP(1,2,6)	10,4 Mio
Standort 3	PK2 (EP), PK1 (ZP)	EP(2-5), ZP(1-6), VP(1-8)	81,1 Mio
Standort 4	PK2 (EP), PK1 (ZP)	EP(1-6), ZP(1-6), VP(1-8)	80,1 Mio
Standort 5	PK2 (EP), PK1 (ZP)	EP(1,3-6), ZP(1-6), VP(1-8)	63,2 Mio
ZK-Werk	-	-	-

Tabelle 6-12: Ergebnisse für das Modell „Produktionsnetzwerk“

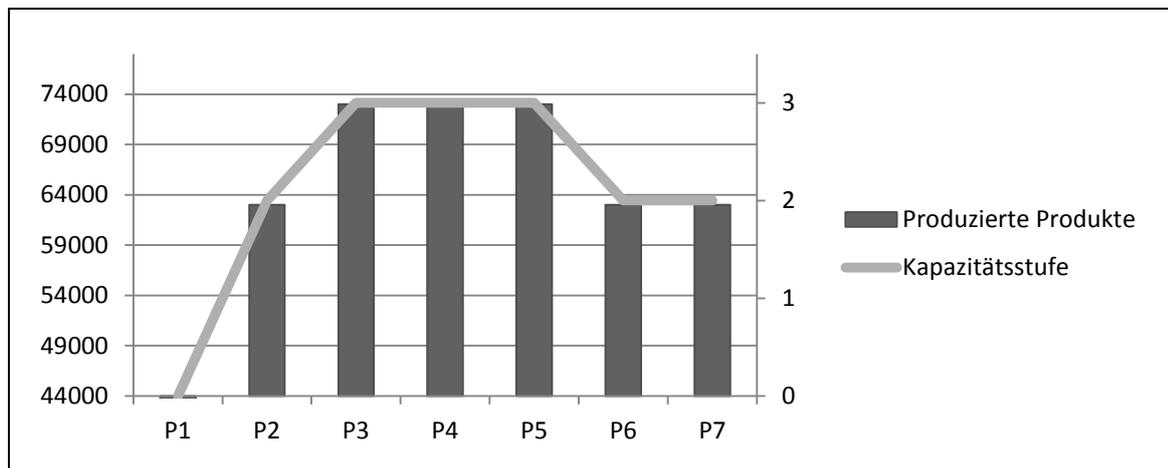


Abbildung 6-2: Produktionsmenge und gewählte Kapazitätsstufen für Arbeitssystem 5

In *Abbildung 6-2* ist beispielhaft die Produktionsmenge sowie die gewählte Kapazitätsstufe von Arbeitssystem 5 dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass das Arbeitssystem erst in Periode 2 aktiviert wird. In den Perioden 3 bis 5, in denen die Nachfrage am höchsten ist, wird das gewählte Produktionssystem in der Kapazitätsstufe 3 betrieben. In den rest-

lichen Perioden ist Kapazitätsstufe 2 gewählt. Die Menge der produzierten Produkte entspricht in allen Perioden der Kapazitätsobergrenze.

6.1.3 Evaluation des Modells zur Lagerauswahl und – dimensionierung und zur Zuordnung von Operationen

Für die Evaluation der Modelle zur Planung des externen Transportnetzwerks wird sich auf die Betrachtung des Beschaffungsnetzwerks beschränkt¹²³. Somit werden die 26 Komponenten abgebildet, die im Modell zur Make-or-Buy Entscheidung als Zukaufkomponenten identifiziert wurden. Diese Komponenten können direkt von den Zulieferern zu den internen Lagern der fünf Produktionsstandorte transportiert werden. Darüber hinaus kann je ein Lieferantenlogistikzentrum (LLZ) je Produktionsstandort genutzt werden. Dieses Lieferantenlogistikzentrum kann vom betrachteten Unternehmen selbst oder von einem externen Logistikdienstleister betrieben werden. Neben den Lieferantenlogistikzentren und den internen Lagern werden Konsolidierungslager unweit der Zuliefererstandorte betrachtet, wo die Warenströme gebündelt werden können, um Transportkosten zu sparen. Es besteht außerdem die Möglichkeit Lager von drei Zulieferern zu nutzen, die sich direkt bei allen Produktionsstandorten befinden. Es gibt zwei unterschiedliche Kapazitätsstufen, in denen die Lager betrieben werden können. Für die Lager der Zulieferer steht allerdings nur eine Kapazitätsstufe zur Auswahl.

Innerhalb des externen Transportnetzwerks besteht die Möglichkeit neben der Lagerung und dem Transport der Komponenten zwei Operationen fremdzuvergeben. Die erste Operation ist die Sequenzierung der Komponenten, die aufgrund der Variantenvielfalt für alle Komponenten notwendig ist. Die zweite Operation stellt die Qualitätskontrolle der Komponenten und die damit verbunden Gewährleistung für evtl. auftretende Mängel dar. Alle Operationen können sowohl in den internen Lagern als auch in den Lieferantenlogistikzentren durchgeführt werden. Außerdem bieten die drei Zulieferer mit den produktionsstandortnahen Lagern die Durchführung der Operationen und damit eine Just-in-Sequence Belieferung an. Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Qualitätskontrolle an zwei weitere Zulieferer auszulagern, für die hierfür jeweils ein weiteres Lager modelliert wird.

¹²³ Der Transport zwischen den Produktionsstandorten und von den Produktionsstandorten zu den Märkten wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Für eine vollständige Bewertung der Gleichteilestrategie sind diese Kosten jedoch zu bestimmen.

Lager	Kapazität	Einmalkosten	Fixkosten	variable Kosten
LLZ1	15.000 (E) 15.000 (I)	0 (E) 1.250.000 (I)	0 (E) 250.000 (I)	1,75-3,93 (E) 0,18-0,40 (I)
LLZ2	3.000 (E) 3.000 (I)	0 (E) 1.250.000 (I)	0 (E) 250.000 (I)	1,75-3,93 (E) 0,18-0,40 (I)
LLZ3	15.000 (E) 15.000 (I)	0 (E) 1.250.000 (I)	0 (E) 250.000 (I)	1,75-3,93 (E) 0,18-0,40 (I)
LLZ4	15.000 (E) 15.000 (I)	0 (E) 1.250.000 (I)	0 (E) 250.000 (I)	1,75-3,93 (E) 0,18-0,40 (I)
LLZ5	18.000 (E) 18.000 (I)	0 (E) 1.250.000 (I)	0 (E) 250.000 (I)	1,75-3,93 (E) 0,18-0,40 (I)
Intern 1	15.000	50.000	200.000	0,12-0,20
Intern 2	3.000	50.000	200.000	0,12-0,20
Intern 3	15.000	50.000	200.000	0,12-0,20
Intern 4	15.000	50.000	200.000	0,12-0,20
Intern 5	18.000	50.000	200.000	0,12-0,20
Konsol. 1	12.000	0	0	1,25
Konsol. 2	10.000	0	0	1,25
Konsol. 3	12.000	0	0	1,25
Konsol. 4	9.000	0	0	1,25

Tabelle 6-13: Mögliche Lagerstandort inkl. Kapazitäten und Kosten für Kapazitätsstufe 1 (ohne Zuliefererlager)

Auf allen Kanten kann zwischen drei unterschiedlichen Transportfrequenzen gewählt werden. Dabei erfolgen bei Frequenz 1 24 Lieferungen, bei Frequenz 2 52 Lieferungen und bei Frequenz 3 252 Lieferungen je Periode. Die Menge an Komponenten, die je Periode je Zulieferer bezogen werden, ergibt sich direkt aus der Lösung des Modells zur Make-or-Buy Entscheidung. Die Nachfragemenge ist hingegen über das Ergebnis des Produktionsnetzwerkmodells und die dazugehörige Stückliste zu berechnen. Die notwendigen Formeln finden sich in Kapitel 5.2.1.1.

Lager	Kapazität	Einmalkosten	Fixkosten	variable Kosten
LLZ1	700.000 (O1) 700.000 (O2)	250.000 (O1) 75.000 (O2)	87.500 (O1) 25.000 (O2)	0,08-0,12 (O1) 0,25-0,33 (O2)
LLZ2	150.000 (O1) 150.000 (O2)	250.000 (O1) 75.000 (O2)	87.500 (O1) 25.000 (O2)	0,08-0,12 (O1) 0,25-0,33 (O2)
LLZ3	700.000 (O1) 700.000 (O2)	250.000 (O1) 75.000 (O2)	87.500 (O1) 25.000 (O2)	0,08-0,12 (O1) 0,25-0,33 (O2)
LLZ4	600.000 (O1) 600.000 (O2)	250.000 (O1) 75.000 (O2)	87.500 (O1) 25.000 (O2)	0,08-0,12 (O1) 0,25-0,33 (O2)
LLZ5	800.000 (O1) 800.000 (O2)	250.000 (O1) 75.000 (O2)	87.500 (O1) 25.000 (O2)	0,08-0,12 (O1) 0,25-0,33 (O2)

Tabelle 6-14: Operationen inkl. Kapazitäten und Kosten für die vom Unternehmen betriebenen LLZ

Das resultierende Modell besteht aus 46.057 Variablen und 42.862 Restriktionen und wurde in 8 Stunden mit einem „MIP-Gap“ von 6,5 % gelöst¹²⁴. Die Gesamtkosten für den Transport der Komponenten belaufen sich auf 53,5 Mio., wovon 21,5 Mio. für den Transport und 30 Mio. für die Lagerung und für die zusätzlichen Operationen verwendet werden. Von diesen 30 Mio. entfallen 16 Mio. auf die fünf internen Lager und 14 Mio. auf die LLZ und die Lager der Zulieferer. Da die Kosten für die internen Lager noch mit Hilfe der Modelle zur internen Produktionslogistik bewertet werden, fließen lediglich die 14 Mio. in die Bewertung der Gleichteilestrategie ein. Die Transportkosten werden im nachfolgenden Modell weiter detailliert.

Es wurden die internen Lager 1-5 sowie die selber betriebenen Lieferantenlogistikzentren 4 und 5 und die extern betriebenen Lieferantenlogistikzentren 1 und 3 ausgewählt. Des Weiteren wurde von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, die Lager der Zulieferer 36, 37, 38 und 40 zu nutzen. *Tabelle 6-15* gibt einen Überblick über die in den Lagern durchgeführten Operationen sowie über die dort gelagerten Produkte.

Lager	Operation	Komponenten
Intern 1	1, 2	K2-K15,K19,K21-K27,K30
Intern 2	1, 2	K21-K23, K25, K28, K30
Intern 3	1, 2	K3,K5-K11,K14,K15,K19, K21-K27,K30
Intern 4	1, 2	K3,K6-K11,K14-K27,K30
Intern 5	1, 2	K3, K6-K16,K18,K20-K26,K30
LLZ 1 (E)	1, 2	K2,K5,K13,K14,K15,K19,K21,K23,K28
LLZ 3 (E)	1, 2	K2,K5,K7,K10,K13,K14,K19,K21,K25,K27,K28
LLZ 4 (I)	1, 2	K2,K3,K5,K8,K10-K21,K23,K25,K26,K28,K30
LLZ 5 (I)	1, 2	K2,K5,K8-K10,K15-K22,K25,K27,K28
ZL 36	1, 2	K16
ZL 37	1, 2	K17
ZL 38	1, 2	K18
ZL 40	1, 2	K20

Tabelle 6-15: Genutzte Lager und zugeordnete Operationen und Produkte

Die Transporte zwischen den unterschiedlichen Knoten des Netzwerks erfolgen in unterschiedlichen Transportfrequenzen. *Tabelle 6-16* zeigt die gewählten Transportfrequenzen und Transportmengen für fünf beispielhafte Komponenten vom Zulieferer zum Produktionsstandort 5.

¹²⁴ Die Optimierung wurde nach 8 Stunden mit der besten gefundenen Lösung abgebrochen. Das Ziel von einem „MIP-Gap“ von 5 % konnte in dieser Zeit mit den Standardeinstellungen der Optimierungssoftware nicht erreicht werden. Auch bei einer längeren Laufzeit konnte keine große Verbesserung erzielt werden.

Komponente	Von	Nach	Frequenz	Transportmenge
K2	Z27	LLZ 5 (E)	1 und 2	221.376
K2	LLZ 5(E)	Standort 5	3	221.376
K6	Z31	Intern 5	2	466.993
K6	Intern 5	Standort 5	3	466.993
K18	Z38	Intern 5	1	291.314
		LLZ 5 (E)	1 und 2	145.842
K18	Intern 5 LLZ 5 (E)	Standort 5	3	291.314
			3	145.842
K24	Z24	Intern 5	1	30.484
K24	Intern 5	Standort 5	3	30.484
K30	Z30	Intern 5	1 und 2	336.060
K30	Intern 5	Standort 5	3	336.060

Tabelle 6-16: Transportmengen und Transportfrequenzen für 5 Komponenten zu Produktionsstandort 5

6.1.4 Evaluation des Modells zur Speditionsauswahl

Für die Bestimmung der Transportkosten müssen für die im vorherigen Modell festgelegten Transportmengen Speditionen ausgewählt werden. Hierbei werden jedoch nicht die Transporte zwischen den Lieferantenlogistikzentren bzw. den internen Lagern und den Standorten betrachtet¹²⁵. Für die anderen Kanten des Netzwerks stehen sechs unterschiedliche Speditionen zur Verfügung. Zwei dieser Speditionen sind vom Unternehmen betriebene Fuhrparks. Hierbei gibt es bereits einen Anfangsbestand von zehn Transportmitteln für die interne Spedition 1 und von 5 Transportmitteln für die interne Spedition 2. Die restlichen vier Speditionen sind externe Speditionen für die weder Mindest- und Maximallaufzeiten noch Mindesttransportmenge vereinbart wurden. Die eigene Spedition 1 und die externen Speditionen 3 und 4 können den Transport der Komponenten von den Zulieferern zu den Standorten 1 bis 3 übernehmen, während die übrigen Speditionen die Standorte 4 und 5 beliefern können. Für jede der externen Speditionen besteht die Möglichkeit zwei unterschiedliche Kapazitätsstufen zu nutzen. Tabelle 6-17 gibt einen Überblick über die Kapazitäten und Kosten der Speditionen. Die Einmal- und Fixkosten für interne Speditionen sind dabei je Transportmittel (TM) angegeben. Dabei ist zu sehen, dass die externen Speditionen bis zu einer gewissen Kapazität ohne die Zahlung von Einmalkosten und mit geringen Fixkosten genutzt werden können. Für die Bereitstellung zusätzlicher Kapazitäten wird dagegen die Zahlung eines hohen Betrages fällig und die Fixkosten verzehnfachen sich.

¹²⁵ Die Transportkosten hierfür werden in den Modellen zur Bestimmung der internen Logistikkosten bestimmt.

Spedition	Kapazitätsstufe	Kapazität	Einmalkosten	Fixkosten
Eigene Spedition 1	-	2.000	150.000	5.000
Eigene Spedition 2	-	2.000	150.000	5.000
Ext. Spedition 1	Kapazität 1	60.000	0	10.000
	Kapazität 2	100.000	1.200.000	100.000
Ext. Spedition 1	Kapazität 1	50.000	0	10.000
	Kapazität 2	80.000	1.000.000	100.000
Ext. Spedition 1	Kapazität 1	60.000	0	10.000
	Kapazität 2	90.000	1.200.000	100.000
Ext. Spedition 1	Kapazität 1	50.000	0	10.000
	Kapazität 2	80.000	1.000.000	100.000

Tabelle 6-17: Speditionen inkl. Kapazitäten und Fix- sowie Einmalkosten

Für jede Komponente wird ein Kapazitätsbedarf je nach Transportfrequenz festgelegt. Außerdem werden variable Transportkosten für jede Kante und jede Frequenz bestimmt. Tabelle 6-18 zeigt einen Auszug dieser Daten für fünf unterschiedliche Komponenten für die externe Spedition 1.

Die restlichen notwendigen Eingabedaten können direkt aus dem Modell zur Lagerauswahl abgeleitet werden. So sind die Kapitalbindungskosten der Komponenten ebenso wie die zur Verfügung stehenden Transportfrequenzen in beiden Modellen identisch. Die Transportmenge sowie die Kapazität der Zwischenlager können wie in Kapitel 5.2.1.1 beschrieben berechnet werden.

Komponente	Frequenz	Kapabedarf	Von	Nach	Transportkosten
K5	F1	1,15	ZL 5	LLZ 1	1,78
	F2	1,27			1,95
	F3	1,5			2,13
K7	F1	1,76	ZL 7	LLZ 3	2,28
	F2	1,94			2,50
	F3	2,29			2,73
K15	F1	1,62	ZL 15	Intern 1	2,09
	F2	1,78			2,30
	F3	2,10			2,51
K24	F1	1,13	ZL 24	Intern 3	2,35
	F2	1,24			2,58
	F3	1,47			2,82
K28	F1	2,07	ZL 3	LLZ 3	2,02
	F2	2,28			2,21
	F3	2,69			2,41
K30	F1	1,22	ZL 30	Intern 2	1,86
	F2	1,34			2,05
	F3	1,58			2,24

Tabelle 6-18: Kapazitätsbedarf und variable Transportkosten für fünf Komponenten auf je einer Kante mit der externen Spedition 1

Das zu lösende Modell besteht aus 19.394 Variablen und 14.313 Restriktionen. Die Lösungszeit betrug auf dem Testsystem 100 Sekunden bei einem „MIP-Gap“ von 1%¹²⁶. Die Gesamtkosten des Modells belaufen sich auf 30 Mio. GE. Die Kosten fließen komplett in die Bewertung der Gleichteilestrategie ein.

Spedition	Kapazitätsstufe/ Anzahl TM	Komponenten
Eigene Spedition 1	49	alle Komponenten
Eigene Spedition 2	61	alle Komponenten
Ext. Spedition 1	1	K8-K10,K13, K17, K21, K22, K28
Ext. Spedition 2	1	K9,K10,K13,K14,K17,K21,K22,K28
Ext. Spedition 3	1	K8-K10,K13,K17,K18,K20-K22,K28
Ext. Spedition 4	1	K8-K10,K13,K14,K17,K20-K22,K28

Tabelle 6-19: Genutzte Speditionen inkl. Kapazitätsstufe/Anzahl TM und zugeordnete Komponenten

Wie in Tabelle 6-19 zu sehen ist, werden für die eigene Spedition 1 49 und für die eigene Spedition 2 61 Transportmittel gekauft. Abbildung 6-3 zeigt die Transportmengen (in Stück) je Periode für jede der Speditionen. Dabei ist zu erkennen, dass die Transportmenge der eigenen Speditionen über den Betrachtungszeitraum relativ konstant bleibt und Transportspitzen durch externe Speditionen bewältigt werden. Dabei werden die externen Speditionen ausschließlich in der Kapazitätsstufe 1 genutzt.

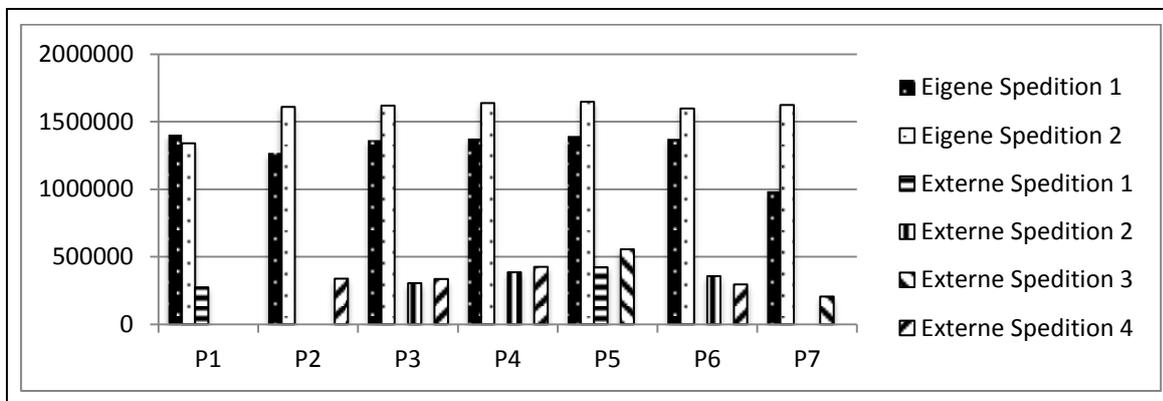


Abbildung 6-3: Transportmenge je Spedition

6.2 Evaluation der Methoden zur Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung

Die Methoden zur Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung wurden direkt von Gans [Gan09] und Altemeier [Alt09] übernommen. Da diese Methoden bereits in den entsprechenden Arbeiten getestet wurden, wird auf eine Evalu-

¹²⁶ Auch bei einer deutlich längeren Laufzeit konnte der „MIP-Gap“ nicht signifikant reduziert werden.

ation in dieser Arbeit verzichtet. So betrachtet Gans die Verteilung von 360 Aufträgen auf eine unterschiedliche Anzahl paralleler Linien¹²⁷. Dabei betrachtet er zuerst den Fall von Fließlinien ohne Ressourcenbeschränkung. Er bestimmt die Clusterzentren einmal analytisch und 20 Mal zufällig. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zwei Clustern eine Reduktion der Gesamtvarianz von 13 % und mit 20 Clustern eine Reduktion von 60 % erreicht werden kann. Er erweitert anschließend den Testfall um die Betrachtung von vier Ressourcen. Dabei untersucht er, wie sich die Ergebnisse für eine Menge von sechs Montagelinien verändern, wenn die Linien vollflexibel, teilflexible und beschränkt sind. Beim vollflexiblen Fall ist auf jeder Linie jede Ressource vorhanden. Bei der teilflexiblen Betrachtung fehlt bei drei der sechs Linien jeweils eine Ressource während im beschränkten Fall zwei Linien mit drei und zwei Linien mit nur zwei Ressourcen ausgestattet sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Gesamtvarianz der vollflexiblen Linien um 29%, der teilflexiblen um 10% und der beschränkten Linien um 5 % reduziert werden können.

Altemeier evaluiert seine Methode mit Hilfe von zwei unterschiedlichen Fließbandabschnitten aus der Praxis eines Automobilherstellers¹²⁸. Er betrachtet dabei ein Auftragsprogramm mit 8.900 Aufträgen. Im ersten Beispiel wird ein Fließbandabschnitt von 107 Arbeitsplätzen untersucht. Durch die Anwendung der Methode wurde eine Reduktion von 487 auf 278 Springereinsätze erreicht, was einer Einsparung von 43 % entspricht. Gleichzeitig konnte die Zahl der notwendigen Springer von 20 um 35 % auf 13 reduziert werden. Der zweite Fließbandabschnitt besteht aus 19 Arbeitsplätzen. Auch hier konnte eine Verbesserung der Springereinsätze (von 122 auf 84) sowie der notwendigen Springer (von 5 auf 4) erreicht werden.

6.3 Evaluation der Modelle zur Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik

6.3.1 Evaluation des Modells zur Auswahl der Lagersysteme und zur Zuordnung von Operationen zu den Lagersystemen

Zur Evaluation der Modelle zur Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik wird der Transport vom Wareneingang über das interne Lager zum Verbauort und vom Ende des Arbeitssystems zum Warenausgang des Produktions-

¹²⁷ Vergleiche hierzu [Gan09] S. 125 – 129

¹²⁸ Vergleiche hierzu [Alt09] S. 159 – 165; die Untersuchung des ersten Fließbandabschnitts wurde in Zusammenarbeit mit dem Autor dieser Arbeit ebenfalls in einem wissenschaftlichen Fachbeitrag veröffentlicht [AHD10].

standorts 2 betrachtet. Das Produktionslogistiksystem besteht aus drei Wareneingängen, sieben möglichen Zwischenlagern, fünf Montagestationen und einem Warenausgang. Alle Vor- und Zwischenprodukte kommen am Wareneingang an, da am Standort kein Arbeitssystem zur Produktion dieser Produkte zugeordnet wurde. Von den Wareneingängen erfolgt der Transport zu einem Zentrallager. Das Zentrallager kann dabei in seiner ursprünglichen Form genutzt oder modernisiert und ggf. ausgebaut werden. Das Zentrallager in seiner ursprünglichen Form bietet jedoch nicht die Möglichkeit Komponenten zu prüfen oder zu sortieren, weshalb bei der Nutzung dieses Lagers anschließend ein Transport zu einem der zwei Supermärkte notwendig wird. Die Supermärkte wiederum beliefern zwei bzw. drei der Montagestationen. Bei einer Nutzung des modernisierten Zentrallagers sind die Supermärkte überflüssig und die Montagestationen können direkt aus dem Zentrallager bedient werden. Für eine kleine Anzahl an Komponenten ist außerdem ein Transport der Komponenten direkt aus Wareneingang 1 zu drei und aus Wareneingang 2 zu zwei Montagestationen möglich.

Nach der Fertigstellung der Endprodukte werden diese zur Qualitätskontrolle und anschließend zum Ausgangslager transportiert. Alternativ hierzu können die Komponenten auch im modernisierten und kapazitiv erweiterten Zentrallager geprüft und gelagert werden. Vom Zentrallager bzw. vom Ausgangslager erfolgt der Transport zum Warenausgang. *Abbildung 6-4* zeigt den schematischen Aufbau des internen Produktionslogistiknetzwerks.

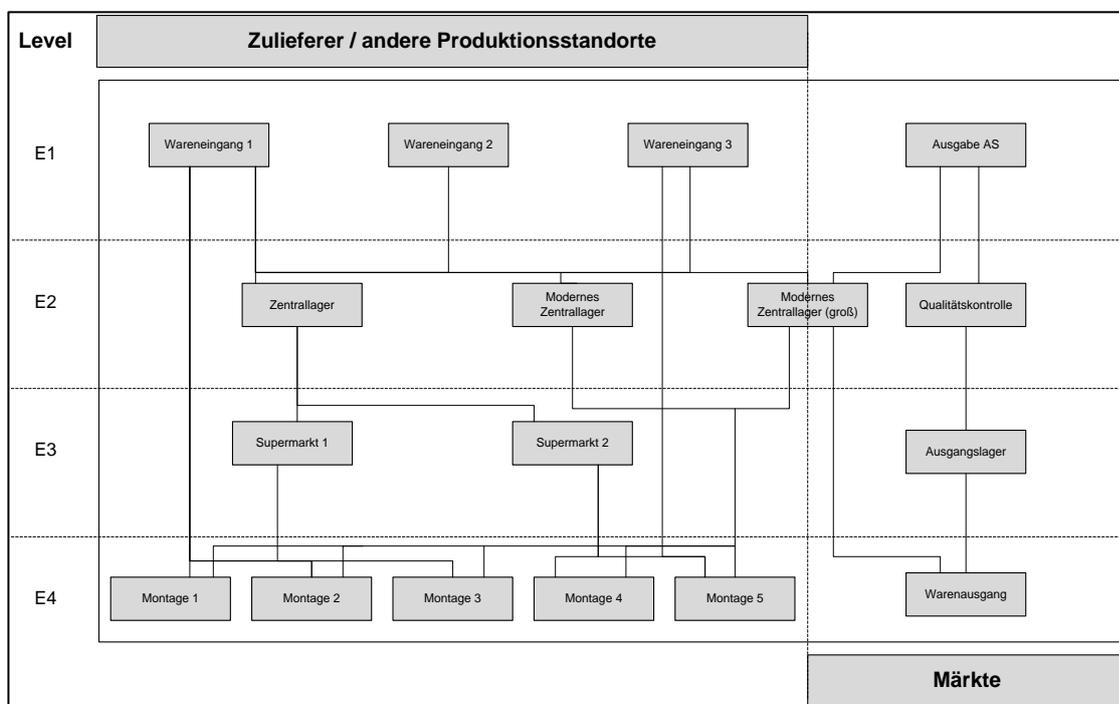


Abbildung 6-4: Schematische Darstellung des internen Produktionslogistiknetzwerks

Die Anzahl der durchzuführenden Operationen ergibt sich aus den dem Standort bzw. dem internen Lager zugeordneten Operationen und der im Modell „Produktionsnetzwerk“ bestimmten Produktionsmenge am Standort¹²⁹. In Kapitel 6.1.3 wurde festgelegt, dass sowohl die Wareneingangsprüfung als auch die Sequenzierung der zugekauften Komponenten im internen Lager erfolgt. Für die selber hergestellten Vor- und Zwischenprodukte muss hingegen keine Prüfung erfolgen und die Komponenten sind lediglich zu sequenzieren. Alle Vor- und Zwischenprodukte sind an der jeweiligen Montagestation in das Endprodukt zu verbauen. Die erstellten Endprodukte sind auf ihre Qualität zu überprüfen und am Warenausgang zu versenden. *Tabelle 6-20* zeigt exemplarisch die Anzahl notwendiger Operationsdurchführungen für Vor-, Zwischen- und Endprodukte.

Operation	Vorprodukt 25	Zwischenprodukt 2	Endprodukt 1
Lagern	18.303	2.917	1.578
Eingangsprüfung	26.660	-	-
Sequenzierung	266.609	151.694	-
Verbau	266.609	151.694	-
Qualitätskontrolle	-	-	82.058
Warenausgang	-	-	82.058

Tabelle 6-20: Anzahl Operationsdurchführungen für ein Vor-, ein Zwischen- und ein Endprodukt (Summe über alle Perioden)

Für die Durchführung einiger Operationen ist gleichzeitig ein gewisser Lagerplatz einzuplanen. So erfordert die Montage der Vor- und Zwischenprodukte einen Lagerbestand von zehn Einheiten. Außerdem müssen bei der Sequenzierung von Komponenten mindestens 50 Einheiten der Komponente gelagert werden. Werden Komponenten auf ihre Qualität überprüft, ist eine Lagerung von mindestens 2% der Anzahl der zu kontrollierenden Komponenten nötig. Es ist eine Lagerung von 200 Einheiten in Transportsystemen möglich. Eine Auslagerung von Operationen ist aus Ermangelung eines Lieferantenlogistikzentrums am Standort nicht vorgesehen.

Für die Nutzung des Wareneingangs 2 fallen keine Einmalkosten an, da dieser zu Beginn des Planungszeitraums bereits besteht. Ebenso können das Zentrallager und die Supermärkte sowie die Qualitätskontrolle und das Ausgangslager ohne Einmalaufwendungen genutzt werden. Für den Umbau in ein modernes Zentrallager fallen hingegen Umbaukosten und für die Eröffnung der Wareneingänge 1 und 3 Aufbaukosten an. Dafür sind die laufenden Fixkosten in den neuen Lagersystemen deutlich niedriger als in den bisherigen Lagersystemen. *Tabelle 6-21* zeigt die notwendigen Kosten und die zur Verfügung stehenden Kapazitäten für alle Lagersysteme.

¹²⁹ Vergleiche Kapitel 5.2.1.3

Lager	Kapazität	Einmalkosten	Fixkosten
Wareneingang 1	500	50.000	5.000
Wareneingang 2	100	0	10.000
Wareneingang 3	500	50.000	5.000
Zentrallager	10.000	0	15.000
mod. Zentrallager	13.000	300.000	15.000
mod. Zentrallager (groß)	15.000	500.000	22.000
Supermarkt 1	7.500	0	10.000
Supermarkt 2	8.000	0	10.000
Qualitätskontrolle	100	0	5.000
Ausgangslager	1.200	0	5.000

Tabelle 6-21: Kosten und Kapazitäten für das Lagern von Produkte der Lagersysteme

Das Zentrallager in seiner bisherigen Form ist nicht dazu geeignet, Operationen außer dem Lagern durchzuführen. Im modernisierten Zentrallager können hingegen die Operationen Eingangsprüfung sowie Sequenzierung erfolgen. In der großen Ausführung des modernisierten Zentrallagers ist zusätzlich die Qualitätskontrolle der Endprodukte möglich. Während die Operationen in den Supermärkten sowie in der Qualitätskontrolle keine Einmalzahlungen erfordern, ist die Installation der notwendigen technischen Anlagen im modernen Zentrallager notwendig. *Tabelle 6-22* gibt einen Überblick über die Kosten und Kapazitäten für Operationen.

Lager	Kapazität	Einmalkosten	Fixkosten
Zentrallager	-	-	-
mod. Zentrallager	25.000 (E) 300.000 (S)	10.000 (E) 15.000(S)	5.000 (E) 5.000 (S)
mod. Zentrallager (groß)	25.000 (E) 300.000 (S) 60.000 (Q)	10.000 (E) 15.000 (S) 10.000 (Q)	5.000 (E) 5.000 (S) 5.000 (Q)
Supermarkt 1	12.000 (E) 150.000 (S)	0 (E) 0 (S)	10.000 (E) 10.000 (S)
Supermarkt 2	15.000 (E) 150.000 (S)	0 (E) 0 (S)	10.000 (E) 10.000 (S)
Qualitätskontrolle	60.000 (Q)	0 (Q)	10.000 (Q)

Tabelle 6-22: Kosten und Kapazitäten für die Operationen Eingangskontrolle (E), Sequenzierung (S) und Qualitätskontrolle (Q)

Das zu lösende Modell besteht aus 9.756 Variablen und 6.903 Restriktionen. Das Modell konnte optimal in 90 Sekunden gelöst werden. Die Gesamtkosten betragen 3,1 Mio. GE, wovon 1,6 Mio. GE auf die Lagerung und Durchführung der Operationen und 1,5 Mio. GE auf den Transport der Komponenten entfallen. Von den drei Wareneingängen wird nur Wareneingang 1 genutzt. Das Zwischenlager wird modernisiert, jedoch nicht erweitert. Daraus resultiert auch die weitere Nutzung der Qualitätskontrolle und des Ausgangslagers. Der Transport der Komponenten erfolgt nahezu ausschließlich

über das modernisierte Zentrallager, allerdings werden einige Komponenten auch im Wareneingang geprüft und sequenziert und anschließend direkt zu den Montagestationen transportiert. *Abbildung 6-5* zeigt das resultierende interne Produktionslogistiknetzwerk.

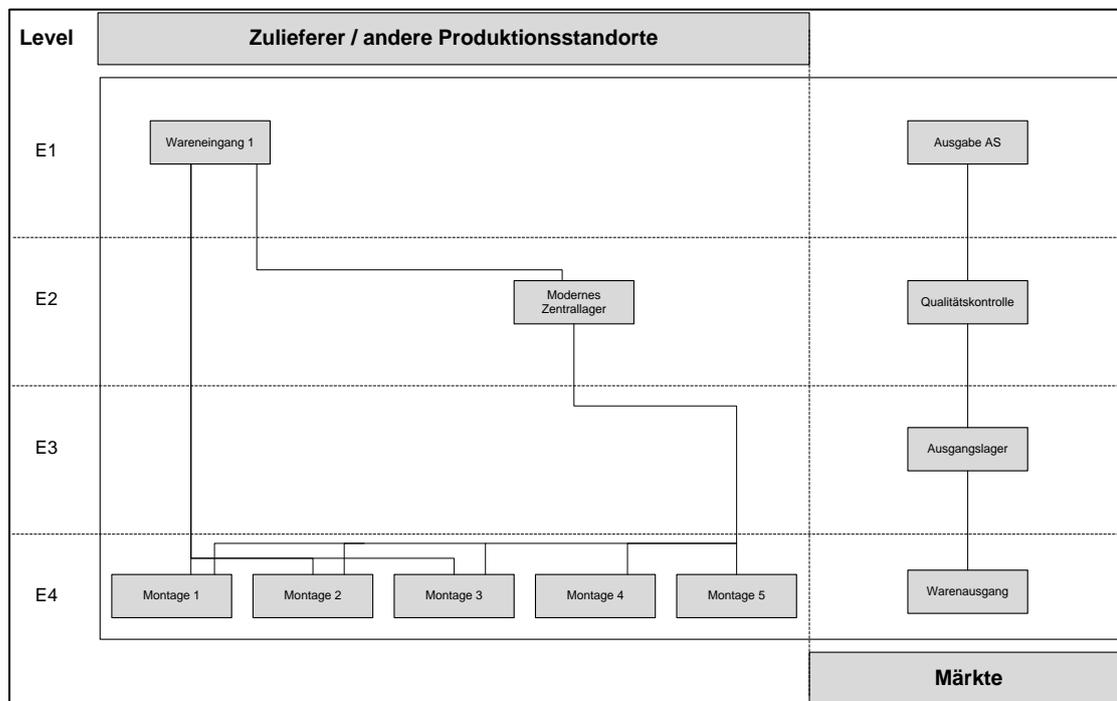


Abbildung 6-5: Kostenoptimales internes Produktionslogistiknetzwerk

Die ermittelten Transportmengen auf den unterschiedlichen Kanten dienen als Eingabedaten für das letzte Optimierungsmodell zur Bestimmung der internen Transportkosten. *Tabelle 6-23* zeigt beispielhaft für je ein Vor-, ein Zwischen- sowie ein Endprodukt die aggregierten Transportmengen über den gesamten Betrachtungszeitraum. Dabei ist zu sehen, dass die Zwischenkomponente 4 sowohl direkt (in den Perioden 2, 3, 4 und 7) als auch über das Zentrallager (in Periode 5 und 6) transportiert wird¹³⁰. Des Weiteren wurden 200 Einheiten von Zwischenprodukt 3 und 4 in jeweils unterschiedlichen Perioden in Transportsystemen gelagert.

Produkt	Lager von	Lager nach	Transportmenge
Endprodukt 1	13	15	82.058
Endprodukt 1	15	16	82.058
Endprodukt 1	16	17	82.058
Vorprodukt 22	1	5	151.694
Vorprodukt 22	5	9	151.694
Zwischenprodukt 4	1	10	110.136

Tabelle 6-23: Transportwege und –mengen für drei beispielhafte Komponenten

¹³⁰ In den Perioden 5 und 6 wird eine andere Komponente direkt zu den Montagestationen transportiert.

6.3.2 Evaluation des Modells zur Auswahl von Transportsystemen und zur Zuordnung von Operationen zu den Transportsystemen

Für den Transport der Vor-, Zwischen und Endprodukte stehen zwölf unterschiedliche Transportsysteme zur Verfügung. Dabei sind sechs der Transportsysteme stetig (ST) und sechs unstetig (US). Für jede Kante des im vorherigen Kapitel bestimmten, internen Produktionslogistiknetzwerks kann entweder ein stetiges oder ein unstetiges Transportsystem genutzt werden. Bei der Nutzung der stetigen Transportsysteme ist eine Lagerung einiger Produkte möglich¹³¹. *Tabelle 6-24* zeigt die Kapazitäten und Kosten für die Transportsysteme. Für unstetige Transportsysteme gilt die Kapazität je Transportmittel und es wird zusätzlich die maximale Anzahl der Transportmittel angegeben.

Transp.Syst	Art	Kapazität	Lagerkapa.	max. TM	Einmalkosten	Fixkosten
TS 1	ST	5.000	80	-	250.000	0
TS 2	US	170	-	10	8.000	5.000
TS 3	ST	1.500	200	-	150.000	0
TS 4	US	80(R1) 100(R2-4)	-	5	8.000	5.000
TS 5	ST	5.000	120	-	250.000	0
TS 6	US	115(R1) 140(R2-3) 170(R4-8)	-	10	8.000	5.000
TS 7	ST	5.000	-	-	250.000	0
TS 8	US	20	-	30	8.000	5.000
TS 9	ST	5.000	-	-	250.000	0
TS 10	US	30	-	30	8.000	5.000
TS 11	ST	5.000	-	-	250.000	0
TS 12	US	30	-	30	8.000	5.000

Tabelle 6-24: Transportsystem inkl. Kapazitäten und Kosten

Tabelle 6-25 zeigt die möglichen Routen der Transportsysteme. Dabei fällt auf, dass für den Transport der Endprodukte¹³² nur eine Route je Transportsystem zur Auswahl steht. Auch für den Transport der Komponenten vom Wareneingang (WE) zum Zentrallager (ZL) kann nur eine Route je Transportsystem gewählt werden. Transportsystem 3 liefert die Komponenten direkt an die Montagestationen (Mo) 1 – 3. Bei Transportsystem 4 stehen vier Routen zur Auswahl. Route 1 verbindet wie beim entsprechenden stetigen Transportsystem den Wareneingang mit den drei Montagestationen. Die Routen 2 – 4 erlauben hingegen nur den Transport zwischen dem Wareneingang und einer der Montagestationen. Für die Verbindung zwischen dem Zentrallager und den Montagestationen

¹³¹ Da keine Endprodukte zur Lagerung in Transportsystemen ausgewählt wurden, ist keine Lagerkapazität in den stetigen Transportsystemen 7, 9 und 11 vorhanden.

¹³² Alle Transportsysteme zwischen dem Arbeitssystem (AS), der Qualitätssicherung (QS), dem Ausgangslager (AL) und der Warenausgang (WA)

nen können Routen für die Verbindung mit allen oder mit zwei bzw. drei Montagestationen ausgewählt werden. Beim stetigen Transportsystem gibt es außerdem die Möglichkeit jeweils eine Route mit je einer Montagestation zu nutzen.

Transportsystem	Route	Start	Ziel	Fahrzeit	Einmalk.	Fixk.
TS 1	1	WE 1	ZL	-	50.000	0
TS 2	1	WE 1	ZL	5	0	1.000
TS 3	1	WE 1	Mo 1 – 3	-	70.000	0
TS 4	1	WE 1	Mo 1 – 3	10	0	1.000
TS 4	2	WE 1	Mo 1	5	0	1.000
TS 4	3	WE 1	Mo 2	6	0	1.000
TS 4	4	WE 1	Mo 3	5	0	1.000
TS 5	1	ZL	Mo 1 – 5	-	150.000	0
TS 5	2	ZL	Mo 1 – 3	-	80.000	0
TS 5	3	ZL	Mo 4 + 5	-	70.000	0
TS 6	1	ZL	Mo 1 – 5	15	0	0
TS 6	2	ZL	Mo 1 – 3	12	0	1.000
TS 6	3	ZL	Mo 4 + 5	10	0	1.000
TS 6	4	ZL	Mo 1	7	0	1.000
TS 6	5	ZL	Mo 2	6	0	1.000
TS 6	6	ZL	Mo 3	5	0	1.000
TS 6	7	ZL	Mo 4	6	0	1.000
TS 6	8	ZL	Mo 5	5	0	1.000
TS 7	1	AS	QS	-	60.000	0
TS 8	1	AS	QS	5	0	1.000
TS 9	1	QS	AL	-	60.000	0
TS 10	1	QS	AL	3	0	1.000
TS 11	1	AL	WA	-	60.000	0
TS 12	1	AL	WA	5	0	1.000

Tabelle 6-25: Mögliche Routen inkl. Fahrzeit und Kosten

Die Bearbeitungszeit je Fahrt ist in allen unstetigen Transportsystemen identisch und beträgt 10 ZE. Der Aufschlag auf Leerfahrten ist in allen unstetigen Transportsystemen 80 %. Der Kapazitätsbedarf der End- sowie der Zwischenprodukte ist 1 während Vorprodukte in den Transportsystemen nur die halbe Kapazität in Anspruch nehmen. *Tabelle 6-26* stellt die variablen Kosten exemplarisch für fünf Komponenten auf einer Kante jeweils für das stetige als auch das unstetige Transportsystem vor. Für das Lagern der Zwischenprodukte in den stetigen Transportsystemen fallen keine weiteren Kosten an. Sollen die Produkte in den Lagersystemen gespeichert werden, so fallen variable Lagerkosten von zwei GE an.

Produkt	Transportsystem	Transport von	Transport nach	Transportkosten
EP 1	9	Qualitätss.	Ausgangsl.	0,02
EP 1	10	Qualitätss.	Ausgangsl.	0,42
ZP 1	1	Wareneingang	Zentrallager	0,05
ZP 1	2	Wareneingang	Zentrallager	0,24
ZP 4	3	Wareneingang	Montage	0,08
ZP 4	4	Wareneingang	Montage	0,29
VP 25	1	Wareneingang	Zentrallager	0,02
VP 25	2	Wareneingang	Zentrallager	0,12
VP 30	5	Zentrallager	Montage	0,05
VP 30	6	Zentrallager	Montage	0,17

Tabelle 6-26: variable Transportkosten für fünf Komponenten auf je zwei Transportsystemen

Das zu lösende Modell besteht aus 4.872 Variablen und 2.748 Restriktionen und wird in 2,9 Sekunden optimal gelöst. Die Gesamtkosten betragen 1,87 Mio.

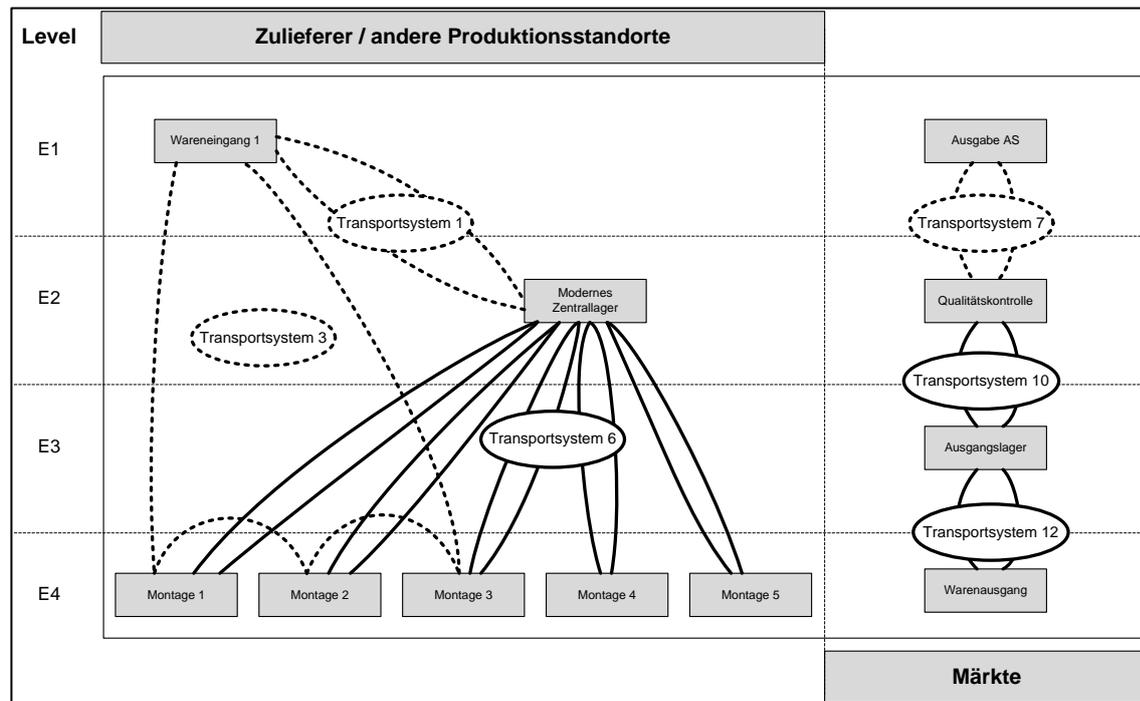


Abbildung 6-6: Kostenoptimale Auswahl der Transportsysteme und Routen

Es wurden die stetigen Transportsysteme 1, 3 und 7 sowie die unstetigen Transportsysteme 6, 10 und 12 aktiviert. Transportsystem 6 wird dabei mit den Routen 4 – 8 genutzt, die das Zentrallager mit jeweils einer Montagestation verbinden. In Transportsystem 6 werden acht Transportmittel benötigt, von denen sechs zu Beginn des Betrachtungszeitraums und zwei in Periode 5 gekauft werden. Das gleiche gilt für Transportsystem 10. Transportsystem 12 verwendet ein Transportmittel zusätzlich, das zu Beginn des Betrachtungszeitraums gekauft wird. *Abbildung 6-6* zeigt das resultierende interne Produk-

tionslogistiknetzwerk mit den gewählten Lager- und Transportsystemen sowie den genutzten Routen.

6.4 Zusammenfassende Bewertung

Die Gesamtkosten für die betrachtete Gleichteilestrategie belaufen sich auf 629,77 Mio. GE plus die Kosten für den Transport der selber erstellten Vorprodukte sowie der Zwischenprodukte zwischen den Produktionsstandorten, den Kosten für den Transport zu den Märkten sowie den internen Logistikkosten an den übrigen Produktionsstandorten. Diese zusätzlichen Kosten können analog zu den präsentierten Fallbeispielen bestimmt werden und werden in dieser Arbeit nicht näher erläutert.

7 Fazit

7.1 Ergebnis der Arbeit

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Bewertung unterschiedlicher Gleichteilestrategien bei variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik entwickelt. Das Verfahren gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil erfolgt die Strukturierung und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks zur Ermittlung der minimalen Herstellkosten bei einer gegebenen Gleichteilestrategie. Dabei wird über den möglichen Fremdbezug von Komponenten entschieden und es werden geeignete Lieferanten ausgewählt. Für alle im Unternehmen zu erstellenden Produkte werden Produktionskonzepte identifiziert und zu möglichen Arbeitssystemen an unterschiedlichen Standorten zugeordnet. Mit der Auswahl und Dimensionierung von Lagerstandorten sowie der Auswahl von Speditionen wird der kostenoptimale Transport der Komponenten und Produkte im externen Unternehmensnetzwerk sichergestellt und es wird über die mögliche Fremdvergabe von Operationen entschieden. Das Verfahren wird in Form eines mathematischen Modells modelliert, das aufgrund seiner Größe in vier Teilmodelle dekomponiert wird.

Der zweite Teil des Lösungsverfahrens ermöglicht die Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung. Bei mehreren parallelen Fließlinien in einem Arbeitssystem werden alle zu fertigenden Produkte so auf die Linien verteilt, dass die Arbeitszeitvarianz minimiert wird. Hierfür wird ein Clusterverfahren genutzt. Für jede Linie erfolgt anschließend eine Austaktung zur Bestimmung der notwendigen Arbeitskräfte. Aufgrund der hohen Komplexität und eines nicht vorhandenen Vorranggraphen wird für die Austaktung ein Entscheidungsunterstützungssystem vorgestellt.

Im dritten und letzten Teil des Lösungsverfahrens wird die interne Produktionslogistik für ausgewählte Lagerstandorte strukturiert und dimensioniert. Dies umfasst sowohl die Auswahl und Dimensionierung von Lagersystemen, als auch die Auswahl von Transportsystemen inkl. der dazugehörigen Transportrouten. Des Weiteren werden die dem betrachteten Standort zugewiesenen Operationen den Systemen zugeordnet. Es wird ein mathematisches Modell vorgestellt, das aufgrund seiner Komplexität in zwei Teilmodelle zerlegt wird.

Um die unterschiedlichen Teilmodelle und Verfahren zusammenzuführen, wird ein hierarchisches Vorgehen entwickelt. Hierbei werden die Verknüpfungen der Ergebnisse vorgelagerter Modelle mit den Eingabedaten nachgelagerter Modelle erläutert und die notwendigen Umrechnungsformeln hergeleitet. Außerdem werden die Berechnungsvorschriften für Kosten, die in die Bewertung der Gleichteilestrategien einfließen, für jedes Modell bzw. Verfahren definiert. Des Weiteren werden mögliche Rückkopplungen be-

schrieben, bei denen die Neuberechnung eines bereits gelösten Modells aufgrund falscher Kostenabschätzungen sinnvoll sein kann. Auch hierfür werden die notwendigen Formeln zur Korrektur der Eingabedaten des neu zu lösenden Modells erläutert.

Die Arbeit beginnt mit einer ausführlichen Beschreibung der Herstellkosten in Produktion und Logistik sowie der Ableitung der variantenabhängigen Kostenbestandteile. Anschließend wird erläutert, wie sich diese Kostenbestandteile durch eine Gleichteilstrategie reduzieren lassen und worin die Herausforderungen an eine Bewertungsmethodik bestehen. Es erfolgt für jedes Teilproblem eine Literaturrecherche, in der wissenschaftliche Arbeiten auf ihre Eignung für das jeweilige Teilproblem untersucht werden. Daraus resultieren nutzbare Modelle und Methoden sowie die zu leistende Arbeit. Die übernommenen Methoden sowie die erstellten Modelle werden anschließend beschrieben und in das hierarchische Verfahren integriert. Den Abschluss der Arbeit bildet eine durchgängige Fallstudie, in der die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik sichergestellt wird.

7.2 Ausblick

Die mathematischen Modelle wurden, wie in Kapitel 6 beschrieben, mit Hilfe der Modellierungssprache XPress-Mosel und des Datenbankprogramms MS Access implementiert. Jedoch stellt die Eingabe der Eingangsdaten in Access bei großen Probleminstanzen einen enormen Arbeitsaufwand dar, weshalb die Erstellung eines geeigneten Programms zur Datenpflege sinnvoll erscheint. Ein solches Programm muss außerdem in der Lage sein, die einzelnen Modelle auszuführen und die Ergebnisse der Modelle zu speichern. Darüber hinaus muss die Verrechnung der Daten zwischen den Modellen in einem solchen Programm durchgeführt werden. Dies ermöglicht eine zentrale Dateneingabe für alle Teilmodelle und vereinfacht sowohl die Datenpflege als auch die Durchführung der Bewertungen und macht die Methodik so für die Praxis nutzbar. In diesem Zuge bietet auch eine Anbindung an ein ERP-System hohe Potentiale, da dadurch der Zugang zu vielen relevanten Planungsdaten ermöglicht wird.

In der Validierung der Modelle wurde festgestellt, dass einige der Modelle bereits bei relativ kleinen Probleminstanzen zu hohen Laufzeiten führen. Dies ist vor dem langfristigen Planungshorizont der Problemstellung weniger relevant als bei der Nutzung operativer Planungsmodelle, kann jedoch bei sehr großen Problemen dazu führen, dass keine Lösungen mehr gefunden werden. Daher sollte überprüft werden, ob eine weitere Dekomposition der Modelle möglich ist oder ob die Verknüpfung der exakten Lösungsmethodik des XPress-Optimizers mit speziellen Heuristiken eine Verkürzung der Laufzeiten ermöglicht.

Ist der Großteil der benötigten Eingabedaten durch Verhandlungen, Erfahrungswerte sowie bestehende Daten möglich, so stellt gerade die Erstellung neuer Produktionskonzepte bei einer veränderten Variantenvielfalt eine besondere Herausforderung dar. Gerade bei Arbeitssystemen mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Maschinen und Anlagen machen viele Kombinationsmöglichkeiten eine Erstellung sinnvoller Produktionskonzepte schwierig. Daher sollte eine Methodik entwickelt werden, die die Zusammenstellung von Produktionskonzepten unterstützt und so den Bewertungsprozess vereinfacht.

8 Literaturverzeichnis

- [ACL95] Agnetis, A., et al.: Balancing flexible lines for car component assembly. *International Journal of Production Research* (1995) , Bd. 33, 2.
- [Alt09] Altemeier, Simon: *Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie*. Paderborn : HNI Verlag, 2009.
- [AHD10] Altemeier, Simon ; Helmdach, Marcel ; Dangelmaier, Wilhelm: Reconfiguration of assembly lines under the influence of high product variety in the automotive industry-a decision support system. *International Journal of Production Research* (2010) , Bd. 48.
- [AM92] Askin, Ronald G. ; Mitwasi, M. George: Integrating facility layout with process selection and capacity planning. *European Journal of Operational Research* (1992) , Bd. 57, 2.
- [Bak85] Baker, Kenneth R.: Safety Stocks and Component Commonality. *Journal of Operations Management* (1985) , Bd. 6, 1.
- [BMN86] Baker, Kenneth R. ; Magazine, Micheal J. ; Nuttle, Henry L. W.: The effect of commonality on safty stock in a simple inventory model. *Management Science* (1986) , Bd. 32, 8.
- [BH03] Bär, T. ; Haasis, S.: Steps towards the Digital Factory. *International Seminar on Manufacturing Systems* (2003) , S. 171-175.
- [BS09a] Becker, Christian ; Scholl, Armin: Balancing assembly lines with variable parallel workplaces: problem definition and effective solution procedure. *European Journal of Operational Research* (2009) , Bd. 1999, 2.
- [BK09] Bihlmaier, Ralf ; Koberstein, Achim ; Obst, René: Modeling and optimizatione of strategic and tactical production planing in the automotive industrie under uncertainty. *OR Spectrum* (2009) , Bd. 31.
- [BRvB06] Bock, Stefan ; Rosenberg, Otto ; von Brackel, Thomas: Controlling mixed-model assembly lines in real-time by using distributed systems. *European Journal of Operational Research* (2006) , Bd. 168, 3.

- [BSS02] Bockhorst, Jos A. C. ; Slomp, Jannes ; Suresh, Nallan C.: An integrated model for part-operation allocation and investments in CNC technology. *International Journal of Production Economics* (2002) , Bd. 75, 3.
- [BS09] Boysen, Nils ; Scholl, Armin: A General Solution Framework for Component-Commonality Problems. *BuR - Business Research* (2009) , Bd. 2, 1.
- [BFS09] Boysen, Nils ; Fliedner, Malte ; Scholl, Armin: Production planning of mixed-model assembly lines: overview and extensions. *Production Planning and Control* (2009) , Bd. 20, 5.
- [Bun08] Bundschuh, Markus Jens: *Modellgestützte strategische Planung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie: Ein flexibler Planungsansatz für die Fahrzeughauptmodule Motor, Fahrwerk und Antriebsstrang*. Hamburg : Verlag Dr. Kovac, 2008.
- [CFG07] Coenenberg, Adolf G. ; Fischer, Thomas M. ; Günther, Thomas: *Kostenrechnung und Kostenanalyse*. Stuttgart : Schöffer-Poeschel Verlag, 2007. 978-3-7910-2491-2.
- [Dan09] Danne, Christoph: *Assessing the cost of assortment complexity in consumer goods supply chains by reconfiguration of inventory and production planning parameters in response to assortment changes*. Paderborn : Heinz-Nixdorf-Institut, 2009.
- [DKS96] Domschke, Wolfgang ; Klein, Robert ; Armin, Scholl: Antizipative Leistungsabstimmung bei moderner Variantenfließfertigung. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* (1996) , Bd. 66.
- [EHH08] Ehmer, Philipp ; Heng, Stefan ; Heymann, Eric: Logistik in Deutschland - Wachstumsbranche in turbulenten Zeiten. *Deutsche Bank Research* (2008) , Bd. 432.
- [ER96] Eynan, Amit ; Rosenblatt, Meir J.: Component commonality effects on inventory costs. *IIE Transactions* (1996) , Bd. 28.
- [Fer05] Ferber, Sonja: *Strategische Kapazitäts- und Investitionsplanung in der globalen Supply Chain eines Automobilherstellers*. Aachen : Shaker Verlag, 2005.

-
- [FRU99] Fischer, Marshall ; Ramdas, Kamalini ; Ulrich, Karl: Component sharing in the Management of Product Variety: A Study of Automotive Braking Systems. *Management Science* (1999) , Bd. 45, 3.
- [FFH06] Fleischmann, Bernhard ; Ferber, Sonja, Henrich, Peter: Strategic Planning of BMW's Global Production Network. *Interfaces* (2006) , Bd. 3, 36.
- [FG09] Frangioni, Antonio ; Gendron, Bernhard: 0-1 reformulations of the multicommodity capacitated network design problem. *Discrete Applied Mathematics* (2009) , Bd. 157, 6.
- [Fre05] Freiwald, Stephanie: *Supply Chain Design: Robuste Planung mit differenzierter Auswahl der Zulieferer*. Frankfurt am Main : Europäischer Verlag der Wissenschaften, 2005.
- [Fri08] Friese, Markus: *Planung von Flexibilitäts- und Kapazitätsstrategien für Produktionsnetzwerke der Automobilindustrie*. Hannover : PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2008.
- [GGR06] Gamberini, Rita ; Grassi, Andrea ; Rimini, Bianca: A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem. *International Journal of Production Economics* (2006) , Bd. 102, 2.
- [Gan09] Gans, Jan Erik: *Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte*. Paderborn : HNI Verlag, 2009.
- [GH89] Gerchak, Yigal ; Henig, Mordechai: Component Commonality in Assemble-To-Order Systems: Models and Properties. *Naval Research Logistics* (1989) , Bd. 36, 1.
- [GMG88] Gerchak, Yigal ; Magazine, Michael J. ; Gamble, A. Bruce: Component Commonality with Service Level Requirements. *Management Science* (1988) , Bd. 34, 6.
- [Gne09] Gneiting, Philipp: *Supply Chain Design für modulare Fahrzeugarchitekturen*. Zürich : ETH Zürich, 2009.

- [GDL05] Gomez-Padilla, Alejandra ; Duvallet, Jeanne ; Llerena, Daniel: Contract Typology as a Research Method in Supply Chain Management. *Research Methodologies in Supply Chain Management* (2005) .
- [Got06] Gottschalk, Sebastian Friedrich: *Dedicated Flexibility – Kapazitätsoptimale Gestaltung manueller Serienmontage*. Aachen : Shaker Verlag, 2006.
- [Göt10] Götze, Uwe: *Kostenrechnung und Kostenmanagement*. Berlin : Springer Verlag, 2010.
- [HS06] Heese, Hans Sebastian ; Swaminathan, Jayashankar: Product Line Design with Component Commonality and Cost-Reduction Effort. *Manufacturing & Service Operations Management* (2006) , Bd. 8, 2.
- [Hen02] Henrich, Christian: *Strategische Gestaltung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie*. Aachen : Shaker Verlag, 2002.
- [Hil00] Hillier, Mark S.: Component commonality in multiple-period, assemble-to-order systems. *IIE Transactions* (2000) , Bd. 32.
- [Hil02] Hillier, Mark S.: Using commonality as backup safety stock. *European Journal of Operational Research* (2002) , Bd. 136.
- [JDS08] Jans, Raf ; Degraeve, Zeger ; Schepens, Luc: Analysis of an industrial component commonality problem. *ScienceDirect* (2008) , Bd. 186.
- [JG95] Jordan, William C. ; Graves, Stephen C.: Principles of the Benefit of Manufacturing Process Flexibility. *Management Science* (1995) , Bd. 41.
- [Kau08] Kauder, Saskia: *Strategische Planung internationaler Produktionsnetzwerke in der Automobilindustrie*. Wien : Onlinekatalog der Universität Wien, 2008.
- [Kem09] Kempkes, Jens-Peter: *Kostenoptimale Materialflüsse in der operativen Zulieferungslogistik der Nutzfahrzeugindustrie*. Paderborn : Universität Paderborn, 2009.
- [Köh88] Köhler, Albrecht: *Beitrag zur Verbesserung der Fertigungskostentransparenz bei Großserienfertigung mit Produktvielfalt*. Stuttgart : Springer Verlag, 1988.

-
- [Kra00] Kratzsch, Sabine: *Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen*. Essen : Vulkan-Verlag, 2000.
- [KR06] Kreuzpointner, Alexandra ; Reißer, Ralf: *Praxishandbuch Beschaffungsmanagement*. Wiesbaden : Gaber Verlag, 2006.
- [Kri06] Kriesel, Clemens: *Szenarioorientierte Unternehmensstrukturoptimierung: Strategische Standort- und Produktionsplanung*. Paderborn : HNI Verlag, 2006.
- [KGJ09] Kummer, Sebastian ; Grün, Oskar ; Jammernegg, Werner: *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik*. München : Pearson Studium, 2009.
- [LBP04] Lahkari, R. S. ; Boparai, R. ; Paulo, J.: Towards an integrated model of operation allocation and material handling selection in cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics* (2004) , Bd. 87, 2.
- [LT86] Leung, Lawrence C. ; Tanchoco, J.M.A.: A profit maximization model for machine/part assignment in a manufacturing system. *Engineering Costs and Production Economics* (1986) , Bd. 10, 1.
- [MNP99] Merengo, C. ; Nava, F. ; Pozzetti, A.: Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* (1999) , Bd. 37, 12.
- [NBR07] Nachtwey, Alexander. ; Behrendt, Andreas ; Riedel, Ralph: Beherrschung der Variantenvielfalt mittels der Clusteranalyse. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 7-8, (2007) , Bd. 102.
- [Nöt04] Nöth, Guntram: *Optimierung der automobilen Wertschöpfungskette mit Hilfe eines genetischen Algorithmus*. Darmstadt : Shaker Verlag, 2004.
- [PW97] Pinnoi, Anulark ; Wilhelm, Wilbert F.: A Branch and Cut approach for workload smoothing on assembly lines. *Inform Journal on Computing* (1997) , Bd. 9, 4.
- [QK08] Qian, Li ; Kong, Zhenyu: Supply Chain Performance with Various Price-dependent Demand Functions and Component Commonality in One Product Family. *4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering* (2008) .

- [RFU03] Ramdas, Kamalini ; Fisher, Marshall ; Ulrich, Karl: Managing Variety for Assembled Products: Modeling Component Systems Sharing. *Manufacturing & Service Operations Management* (2003) , Bd. 5, 2.
- [RU01] Randall, Taylor ; Ulrich, Karl: Product Variety, Supply Chain Structure and Firm Performance: Analysis of the U.S. Bicycle Industry. *Management Science* (2001) , Bd. 47, 12.
- [Rei02] Reith-Ahlemeier, G.: *Ressourcenorientierte Bestellmengenplanung und Lieferantenauswahl: Modelle und Algorithmen für Supply-Chain-Optimierung und E-Commerce*. Leichlingen : Books on Demand GmbH, 2002.
- [Sal55] Salveson, M.E.: The assembly line balancing problem. *The Journal of Industrial Engineering* (1955) , Bd. 6, 3.
- [Saw95] Sawik, Tadeusz: Integer programming models for the design and balancing of flexible assembly systems. *Mathematical and Computer Modelling* (1995) , Bd. 21, 4.
- [Sch90] Schmidt, Volker: *Entwicklung und Planung gruppenorientierter Arbeitsstrukturen für die Montage komplexer und variantenreicher Produkte in der Automobilproduktion*. Braunschweig : Technische Universität Braunschweig, 1990.
- [Sch94] Schneeweiß, Christoph: Elemente einer Theorie hierarchischer Planung. *OR Spektrum* (1994) , Bd. 16, 2.
- [SK03] Schweitzer, Marcell ; Küpper, Hans-Ulrich: *Systeme der Kosten- und Erlösrechnung, 8. Auflage*. München : Verlag Franz Vahlen, 2003. 3-8006-3009-5.
- [SE99] Seo, Yoonho ; Egbelu, Pius J.: Integrated manufacturing planning for an AGV-based FMS. *International Journal of Production Economics* (199) , Bde. 60-61.
- [SZ09] Song, Jing-Sheng ; Zhao, Yao: The Value of Component Commonality in a Dynamic Inventory System with Lead Times. *Manufacturing & Service Operations Management* (2009) , Bd. 11, 3.

-
- [Sta96] Stadler, Hartmut: Hierarchische Produktionsplanung. In: Kern, Werner ; Schröder, Hans-Horst ; Weber, Jürgen: *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1996.
- [Sue07] Suer, Harald: *Vertragsgestaltung am Beispiel des Liefervertrages*. s.l. : GRIN Verlag, 2007.
- [SL07] Sujono, S. ; Lashkari, R. S.: A multi-objective model of operation allocation and material handling system selection in FMS design. *International Journal of Production Economics* (2007) , Bd. 105, 1.
- [Sys07] Syska, A.: *Produktionsmanagement - Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. s.l. : Gabler, 2007. S. 83-84.
- [TG05] Tempelmeier, Horst ; Günther, Hans-Otto: *Produktions und Logistik, 6. Auflage*. Berlin : s.n., 2005.
- [TS07] Thomadsen, Tommy ; Stidsen, Thomas: The generalized fixed-charge network design problem. *Computers & operations research : and their applications to problems of world concerns* (2007) , Bd. 34, 4.
- [TB00] Thonemann, Ulrich ; Brandeau, Margaret: Optimal Commonality in Component Design. *OR Practice* (2000) , Bd. 48, 1.
- [TB02] Thonemann, Ulrich W. ; Bradley, James R.: The effect of product variety on supply-chain performance. *European Journal of Operational Research* (2002) , Bd. 143.
- [Tim09] Timm, Thorsten: *Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen*. Paderborn : Heinz Nixdorf Institut, 2009.
- [Ton08] Tonigold, Christian: *Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten*. Paderborn : Heinz Nixdorf Institut, 2008.
- [Wer08] Werner, Hartmud: *Supply Chain Management: Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling*. s.l. : Gabler Verlag, 2008.

- [Zei95] Zeile, U.: *Montagestrukturplanung für variantenreiche Serienprodukte*. Berlin : Springer Verlag, 1995.

Anhang

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Indizes

$a \in A$	Anlieferfrequenzprofile
$b \in B$	Ausstattungsmerkmale für Komponenten
$c \in C$	Cluster
$d \in D$	Rabattstufen
$e \in E$	Systemebenen bei der internen Produktionsversorgung
$i, \hat{i} \in I$	Komponenten
$j, \hat{j}, \bar{j} \in J$	Lager, Lagersysteme
$l, \hat{l} \in L$	Arbeitssysteme
$m \in M$	Absatzmärkte
$n, \hat{n} \in N$	Kapazitätsstufen
$o, \hat{o} \in O$	Operationen
$p \in P$	Produktionskonzepte
$q \in Q$	Kategorien für die Qualifikation von Arbeitskräften
$r \in R$	Routen
$s \in S$	Produktionsstandorte
$t \in T$	Planungsperioden
$v, \hat{v} \in V$	Menge der Knoten des Netzwerks
$w \in W$	Arbeitsplätze
$z \in Z$	Zulieferer
$\alpha \in A$	Arbeitsvorgänge (AVos)
$\zeta \in Z$	Montagelinien
$\rho \in P$	Ressourcen, Maschinen und Anlagen
$\tau, \hat{\tau} \in T$	Spediteure, Transportsysteme

Problembeschreibung

Indexmengen

I^{EP}	Menge aller Endprodukte
----------	-------------------------

I^{FB}	Menge aller fremdbeschafften Bauteile
I_l^{In}	Menge an Inputfaktoren in Arbeitssystem l
I_l^{Out}	Menge aller Outputfaktoren in Arbeitssystem l
P_{wl}^W	Menge an Maschinen auf Arbeitsplatz w in Arbeitssystem l
T^{ST}	Menge aller stetigen Transportsysteme
T^{US}	Menge aller unstetigen Transportsysteme

Parameter

c_l^{ASK-L}	Kosten für Ausschuss im Betrachtungszeitraum in Arbeitssystem l [GE]
c_{il}^{FK-L}	Fertigungskosten für die Herstellung einer Produkteinheit von Outputfaktor i in Arbeitssystem l [GE]/[ME]
c_i^{HK-I}	Durchschnittliche Herstellkosten einer Produkteinheit von Endprodukt i [GE]/[ME]
c_i^{HK-I-P}	Durchschnittliche Herstellkosten einer Produkteinheit von Bauteil i in allen Arbeitssystemen der Produktion [GE]/[ME]
c_{il}^{HK-L}	Herstellkosten einer Produkteinheit von Outputfaktor i in Arbeitssystem l [GE]/[ME]
c_i^I	Einstandspreis für Inputfaktor i [GE]/[ME]
c_l^{IHK-L}	Erhöhte Instandhaltungskosten aufgrund der vorhandenen Variantenvielfalt in Arbeitssystem l [GE]
$c_{\rho l}^{IHK-P}$	Instandhaltungskosten für Betriebsmittel ρ in Arbeitssystem l [GE]
$c_{\rho l}^{IHK-P-VL}$	Instandhaltungskosten für Betriebsmittel ρ in Arbeitssystem l unter der Annahme, dass ausschließlich dieses Betriebsmittel genutzt wird [GE]
$c_l^{LA-AK-L}$	Losanlauf-Auftragskosten im Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum [GE]
$c_l^{LA-BK-L}$	Losanlauf-Belegungskosten im Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum [GE]
c_l^{LAK-L}	Losanlaufkosten im Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum [GE]
c_i^{LK-I}	Lagerkosten für eine Produkteinheit von Bauteil i [GE]/[ME]
c_j^{LK-J}	Mengenunabhängige Lagerkosten in Lager/Lagersystem j [GE]
$c_j^{LK-J-VL}$	Mengenunabhängige Lagerkosten in Lager/Lagersystem j unter der Annahme, dass alle Komponenten nur noch in einer Variante benötigt werden [GE]
c^{LK-V}	Variantenabhängige Lagerkosten im Betrachtungszeitraum [GE]
c_q^{Lohn}	Lohnkosten für Arbeitskräfte mit der Qualifikation q im Betrachtungszeitraum [GE]

c_{il}^{MK-L}	Materialkosten für die Herstellung einer Produkteinheit von Outputfaktor i in Arbeitssystem l [GE]/[ME]
$c_l^{NA-AS-K}$	Kosten für Nacharbeit und Ausschuss im Betrachtungszeitraum in Arbeitssystem l [GE]
$c_l^{NA-SP-K}$	Kosten für Nacharbeit verursacht durch notwendige Springereinsätze in Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum [GE]
c_l^{NAK-AK}	Nacharbeits-Auftragskosten in Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum [GE]
c_l^{NAK-BK}	Nacharbeits-Belegungskosten in Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum [GE]
c_i^{OK-I}	Kosten für zusätzliche Operationen für eine Produkteinheit von Bauteil i [GE]/[ME]
c_{ov}^{OK-V}	Mengenunabhängige Kosten für Maschinen und Personal zur Durchführung von Operation o an Standort v [GE]
$c_{ov}^{OK-V-VL}$	Mengenunabhängige Kosten für Maschinen und Personal zur Durchführung von Operation o an Standort v unter der Annahme, dass alle Komponenten nur noch in einer Variante benötigt werden [GE]
c^{OK-VK}	Variantenabhängige Kosten für Operationen im Betrachtungszeitraum [GE]
c_{iz}^{Preis}	Preis für Komponente i bei Zulieferer z [GE]/[ME]
$c_{iz}^{Preis-VL}$	Preis eines Bauteils i bei Zulieferer z unter der Annahme, dass alle Varianten der Komponente von i durch i ersetzt worden sind [GE]
c_l^{RAK-L}	Rüstauftragskosten in Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum [GE]
c_l^{RBK-L}	Rüstbelegungskosten im Betrachtungszeitraum für Arbeitssystem l [GE]
c_l^{RK-L}	Rüstkosten in Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum [GE]
c_l^{SP-NA}	Kosten für Nacharbeit verursacht durch einen Springereinsatz in Arbeitssystem l [GE]
c_l^{SPK}	Mehrkosten durch das Vorhalten von Springern im Betrachtungszeitraum in Arbeitssystem l [GE]
c_l^{TAK}	Taktausgleichskosten für Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum [GE]
$c_i^{TK-Ext-I}$	Transportkosten im externen Unternehmensnetzwerk für eine Produkteinheit von Bauteil i [GE]/[ME]
c^{TK-V}	Variantenabhängige Transportkosten im Betrachtungszeitraum [GE]
$c_i^{TK-Int-I}$	Transportkosten im internen Standortnetzwerk für eine Produkteinheit von Bauteil i [GE]/[ME]

c_{τ}^{TK-T}	Transportmengenunabhängige Kosten für Spedition/Transportsystem τ im Betrachtungszeitraum [GE]
$c_{\tau}^{TK-T-VL}$	Transportmengenunabhängige Kosten für Spedition/Transportsystem τ im Betrachtungszeitraum unter der Annahme, dass alle Komponenten nur noch in einer Variante benötigt werden [GE]
c_{ij}^{Var-J}	Variable Lagerkosten von Bauteil i in Lager/Lagersystem j [GE]/[ME]
c_{ivo}^{Var-O}	Variable Operationskosten von Operation o an Standort v für Bauteil i [GE]/[ME]
$c_{\tau v \hat{v}}^{Var-T}$	Variable Transportkosten für einen Transport von Spedition/Transportsystem τ von Knoten v nach Knoten \hat{v} [GE]
c_i^{Wert-I}	Wert eines Bauteils i [GE]/[ME]
c_z^Z	Kosten, die während des Betrachtungszeitraums für die Lieferantenbeziehung mit Zulieferer z anfallen [GE]
c_i^{ZK-I}	Einkaufskosten für eine Produkteinheit von Bauteil i [GE]/[ME]
c^{ZK-V}	Variantenabhängige Kosten bei Zulieferern im Betrachtungszeitraum [GE]
c_{ρ}^P	Kosten für eine Maschine ρ im Betrachtungszeitraum [GE]
d_i^{AnzV}	Anzahl Varianten einer Komponente i
$d_{i\hat{i}l}^{AS}$	Anzahl an Ausschuss-Outputfaktoren nach einem Sortenwechsel von Outputfaktor i nach Outputfaktor \hat{i} in Arbeitssystem l [ME]
d_{iz}^{BM}	Bestellmenge von Bauteil i bei Zulieferer z [ME]
$d_{i\hat{i}}^{Bom}$	Menge von Inputfaktor i , die zur Herstellung einer Mengeneinheit von Outputfaktor \hat{i} benötigt werden [ME]/[ME]
d_i^I	Anzahl an Bauteilen/Endprodukten i , die im Betrachtungszeitraum verbraucht, verbaut oder verkauft wurden
$d_{i\hat{i}l}^{I-L}$	Menge von Inputfaktor i , der in Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum verbraucht wird [ME]/[ZE]
$d_{\rho l}^{IH}$	Anzahl Instandhaltungen im Betrachtungszeitraum für Betriebsmittel ρ in Arbeitssystem l
d_i^{KM}	Menge an zugekauften Bauteilen i im Betrachtungszeitraum [ME]
$d_{l\rho}^{L-P}$	Anzahl an Maschinen ρ , die im Arbeitssystem l genutzt werden
$d_{i\hat{i}l}^{LA}$	Ausbringungsmenge während der Losanlaufzeit nach dem Rüsten von Outputfaktor i nach Outputfaktor \hat{i} in Arbeitssystem l [ME]
d_{ij}^{LM-J}	Lagermenge von Bauteil i in Lager j [ME]
$d_{ij}^{LM-J-VL}$	Lagermenge von Bauteil i in Lager j unter der Annahme, dass alle Komponenten nur noch in einer Variante benötigt werden [GE]

d_{iil}^{NA}	Anzahl an Outputfaktoren \hat{i} , die nach dem Umrüsten von Outputfaktor i in Arbeitssystem l nachgearbeitet werden müssen [ME]
d_{ivo}^{OD-V}	Anzahl an Operationsdurchführungen im Betrachtungszeitraum von Operation o an Standort v für Bauteil i
$d_{ivo}^{OD-V-VL}$	Anzahl an Operationsdurchführungen im Betrachtungszeitraum von Operation o an Standort v für Bauteil i unter der Annahme, dass alle Komponenten nur noch in einer Variante benötigt werden
d_{il}^{Out}	Menge an Outputfaktoren i , die auf Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum hergestellt wurden [ME]/[ZE]
d_{ql}^{Q-L}	Anzahl Arbeiter mit der Qualifikation q in Arbeitssystem l
$d_{iil}^{Rüst}$	Anzahl der Rüstvorgänge von Outputfaktor i nach Outputfaktor \hat{i} in Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum
d_l^{SP-L}	Anzahl von Springer, die während des Betrachtungszeitraums im Arbeitssystem l beschäftigt werden
d_l^{SPE-L}	Anzahl Springereinsätze in Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum
$d_{\rho l}^{SI}$	Anzahl an Outputfaktoren nach denen Betriebsmittel ρ in Arbeitssystem l instandgehalten werden muss [ME]
$d_{\tau v \hat{v}}^{TA-T}$	Anzahl an Transporten, die im Betrachtungszeitraum von Spedition/Transportsystem τ von Knoten v nach Knoten \hat{v} erfolgt sind
$d_{\tau v \hat{v}}^{TA-T-VL}$	Anzahl an Transporten von Spedition/Transportsystem τ von Knoten v nach Knoten \hat{v} unter der Annahme, dass alle Komponenten nur noch in einer Variante benötigt werden
d^{Takte}	Anzahl an Takten im Betrachtungszeitraum
$d_{wl}^{Takter-W}$	Anzahl an zur Verfügung stehende Takte je Outputfaktor an Arbeitsplatz w in Arbeitssystem l
$d_{itv\hat{v}}^{TM-V}$	Transportmenge von Bauteil i mit Spedition τ von Knoten v nach Knoten \hat{v} [ME]
d_{il}^{Voll}	Ausbringungsmenge von Outputfaktor i auf Arbeitssystem l im Normalbetrieb[ME]
$d_{wl\rho}^{W-P}$	Anzahl Maschinen vom Typ ρ auf Arbeitsplatz w in Arbeitssystem l
$d_{\rho lt}^{P-T}$	Anzahl produzierter Outputfaktoren auf Betriebsmittel ρ in Arbeitssystem l innerhalb der Zeit t [ME]
i	Kalkulatorischer Zinssatz
p_{il}^{l-L}	Produktionsleistung von Arbeitssystem l für Outputfaktor i [ME]/[ZE]
t_{ilq}^{AZ-D-I}	Summe der Arbeitszeiten aller Arbeitskräfte mit der Qualifikation q an Arbeitssystem l zur Herstellung einer Produkteinheit von Outputfaktor i [ZE]/[ME]

t_{ql}^{AZ-G}	Summe der Arbeitszeiten aller Arbeitskräfte mit der Qualifikation q in Arbeitssystem l , die nicht direkt einem Outputfaktor zugewiesen werden können [ZE]
$t_{iwl}^{Bearb-l}$	Bearbeitungszeit von Outputfaktor i auf Arbeitsplatz w in Arbeitssystem l [ZE]
$t_{\rho q}^{IHK-Q}$	Zeit, die Arbeitskräfte mit der Qualifikation q für eine Instandhaltung von Betriebsmittel ρ benötigen [ZE]
$t_{\rho l}^{II-L}$	Zeitabstand zwischen zwei Instandhaltungsintervallen eines Betriebsmittels ρ in Arbeitssystem l [ZE]
t_{iil}^{LA}	Durch die Minderleistung nach dem Rüstvorgang von Outputfaktor i nach Outputfaktor \hat{i} in Arbeitssystem l verlorene Arbeitszeit [ZE]
t_{ij}^{LD-J}	Durchschnittliche Lagerdauer von Bauteil i in Lager j [ZE]
$t_{ij}^{LD-J-VL}$	Durchschnittliche Lagerdauer von Bauteil i in Lager j unter der Annahme, dass alle Komponenten nur noch in einer Variante benötigt werden [ZE]
t_{iq}^{NA-Q}	Arbeitszeit von Arbeitern mit der Qualifikation q für die Nacharbeit eines Outputfaktors i [ZE]
$t_{i\rho}^{NA-P}$	Zeit, die Maschine ρ für die Nacharbeit eines Outputfaktors i benötigt [ZE]
t_q^{Q-BZ}	Gesamtarbeitszeit einer Arbeitskraft mit der Qualifikation q im Betrachtungszeitraum [ZE]
$t_{iil}^{Rüst}$	Rüstzeit für das Rüsten von Outputfaktor i nach Outputfaktor \hat{i} in Arbeitssystem l [ZE]
$t_{iitql}^{Rüst-Q}$	Arbeitszeit, die Arbeiter mit der Qualifikation q für einen Rüstvorgang von Outputfaktor i nach Outputfaktor \hat{i} in Arbeitssystem l benötigen [ZE]
$t_{\rho l}^{SI}$	Serviceintervallzeit von Betriebsmittel ρ in Arbeitssystem l [ZE]
t_{wl}^{TA}	Taktausgleich eines Arbeitsplatzes w im Arbeitssystem l im Betrachtungszeitraum [ZE]
t_{wl}^{TA-SP}	Durch Springereinsätze verursachte Taktausgleichsverluste auf Arbeitsplatz w in Arbeitssystem l [ZE]
t_i^{Takt}	Taktzeit in Arbeitssystem l [ZE]
$t_{\tau\hat{v}}^{TD-V}$	Transportdauer für einen Transport von Spedition τ von Knoten v nach Knoten \hat{v} [ZE]
t_{ρ}^{P-BZ}	Nutzungszeit der Maschine ρ im Betrachtungszeitraum [ZE]
u_i^{GTG}	Gleichteilegrad von Komponente i

$u_{i\hat{i}}^{ZS-I}$	Zuschlagsfaktor, der angibt, wie viel Prozent von Inputfaktor i zur Herstellung aller Einheiten von Outputfaktor \hat{i} zugerechnet werden
u_{ij}^{ZS-J}	Zuschlagsfaktor, der angibt, wie viel Prozent der mengenunabhängigen Lagerkosten von Lager/Lagersystem j allen Einheiten von Bauteil i zugerechnet werden
$u_{\rho i}^{ZS-P}$	Zuschlagsfaktor, der angibt, wie viel Prozent der Kosten für die Maschinen ρ zu allen Einheiten von Outputfaktor i zugerechnet werden
u_{iq}^{ZS-Q}	Zuschlagsfaktor, der angibt, wie viel Prozent der nicht direkt zuordenbaren Arbeitszeit von Arbeitskräften mit der Qualifikation q zu allen Einheiten von Outputfaktor i zugerechnet werden
u_{ivo}^{ZS-V-O}	Zuschlagsfaktor, der angibt, wie viel Prozent der mengenunabhängigen Operationskosten von Operation o an Standort v allen Einheiten von Bauteil i zugerechnet werden
u_{iz}^{ZS-Z}	Zuschlagsfaktor, der angibt, wie viel Prozent der Kosten für die Lieferantenbeziehung mit Zulieferer z zu allen Einheiten von Bauteil i zugerechnet werden
$u_{i\tau}^{ZS-T}$	Zuschlagsfaktor, der angibt, wie viel Prozent der transportmengenunabhängigen Kosten für Spedition/Transportsystem τ allen Einheiten von Bauteil i zugerechnet werden
$u_{itv\hat{v}}^{ZS-T-Var}$	Zuschlagsfaktor, der angibt, wie viel Prozent der Kosten für die Transporte von Spedition/Transportsystem τ von Knoten v nach Knoten \hat{v} allen Einheiten von Bauteil i zugerechnet werden
z_{iwl}^{SE-W}	Binärparameter, der angibt, ob für Outputfaktor i auf Arbeitsplatz w in Arbeitssystem l ein Springer eingesetzt wurde

Strukturierung- und Dimensionierung des Produktions- und Transportnetzwerks

Indexmengen

A_{τ}^T	Menge an Frequenzen a , die bei Spediteur τ zur Auswahl stehen
$D_{iz}^{Pos-I-Z}$	Menge an Rabattstufen d , die bei Zulieferer z für Produkt i zur Auswahl stehen
$I_{\hat{i}}^{BOM}$	Menge an Komponenten i , die in Produkte \hat{i} zu verbauen sind
J_{jj}^{Zus}	Menge der Lager \hat{j} , die nicht gemeinsam mit Lager j gewählt werden dürfen

L^{Init}	Menge der Arbeitssysteme l , für die bereits zu Beginn des Planungszeitraums eine Kapazitätsstufe festgelegt ist
L_i^{Pos}	Menge von Arbeitssystemen l auf denen Produkt i hergestellt werden kann
L_{il}^{Transp}	Menge von Arbeitssystemen \hat{l} zu denen Produkt i von Arbeitssystem l transportiert werden darf
M_{il}^{Distr}	Menge von Absatzmärkten m zu denen Produkt i von Arbeitssystem l transportiert werden kann
N_j^{Pos-J}	Menge an möglichen Kapazitätsstufen n , die für Lager j gewählt werden können
N_{lp}^{Pos-P}	Menge an möglichen Kapazitätsstufen n , die für Produktionskonzept p auf Arbeitssystem l gewählt werden können
N_τ^{Pos-T}	Menge an möglichen Kapazitätsstufen n , die für Spediteur τ gewählt werden können
$O^{Fabriknah}$	Menge an Operationen o , die nur in der Nähe ihres Weiterverarbeitungsorts durchgeführt werden dürfen
$O^{Fabrikfern}$	Menge an Operationen o , die an beliebigen Orten im Produktionsnetzwerk durchgeführt werden dürfen
O_j^J	Menge an Operationen o , die in Lager j durchgeführt werden können
Z_i^I	Menge an Zulieferern z , bei denen Produkt i bezogen werden kann
Z^{Intern}	Menge an Zulieferern z , die interne Lieferanten repräsentieren
T_τ^{Eigen}	Menge der Spediteure τ , die aus eigenen Transportmitteln bestehen
V_v^{Transp}	Menge aller Knoten \hat{v} , die von Knoten v beliefert werden können
$T_{v\hat{v}}^{Kante-T}$	Menge aller Spediteure τ , die die Kanten (v, \hat{v}) bedienen können
$T_{\tau\hat{\tau}}^{Zus}$	Menge der Lager $\hat{\tau}$, die nicht gemeinsam mit Lager τ gewählt werden dürfen

Parameter

$bigM$	Sehr große Zahl
c_{jo}^{EK-J-O}	Einmalige Kosten für die Installation der technischen Anlagen zur Durchführung der Operation o an Standort j [GE]
c_{ilp}^{EK-P-I}	Produktspezifische, einmalige Kosten für die Zuordnung von Produkt i zu Arbeitssystem l in Produktionskonzept p [GE]
c_τ^{EK-TM}	Einmalige Kosten für ein Transportmittel bei Spediteur τ [GE]
c_z^{EK-Z}	Einmalige Kosten für die Eröffnung einer Geschäftsbeziehung mit Zulieferer z [GE]

c_{jn}^{Fix-J}	Fixkosten für Lager j in Kapazitätsstufe n [GE]
$c_{jo}^{Fix-J-O}$	Fixkosten für die Durchführung der Operation o an Standort j [GE]
c_{lpn}^{Fix-P}	Fixkosten für Arbeitssystem l mit Produktionskonzept p in Kapazitätsstufe n [GE]
c_{τ}^{Fix-TM}	Fixkosten für ein Transportmittel bei Spediteur τ [GE]
c_z^{Fix-Z}	Fixkosten für die Aufrechterhaltung der Lieferantenbeziehung mit Zulieferer z [GE]
$c_{\tau n}^{Fix-T}$	Fixkosten für Spediteur τ in Kapazitätsstufe n [GE]
c_i^{KBK}	Kapitalbindungskosten für Produkt i [GE]/[ME]
$c_{jn\hat{n}}^{KW-J}$	Einmalige Kosten für den Wechsel von Kapazitätsstufe n nach Kapazitätsstufe \hat{n} bei Lager j [GE]
$c_{lpn\hat{n}}^{KW-P}$	Einmalige Kosten für den Wechsel von Kapazitätsstufe n nach Kapazitätsstufe \hat{n} bei Produktionskonzept p in Arbeitssystem l [GE]
$c_{\tau n\hat{n}}^{KW-T}$	Einmalige Kosten für den Wechsel von Kapazitätsstufe n zu Kapazitätsstufe \hat{n} bei Spediteur τ [GE]
c_{im}^{SK}	Strafkosten für unerfüllte Nachfrage von Produkt i in Absatzmarkt m [GE]/[ME]
$c_{iv\hat{v}a}^{Transp-J}$	Variable Transportkosten für ein Produkt i von Knoten v zu Knoten \hat{v} bei Bestellfrequenz a (inkl. anteiliger Einmal- und Fixkosten) [GE]/[ME]
$c_{ilm}^{Transp-M}$	Variable Transportkosten von Produkt i von Arbeitssystem l zum Absatzmarkt m [GE]/[ME]
$c_{il\hat{l}}^{Transp-P}$	Variable Transportkosten für den Transport von Produkt i von Arbeitssystem l nach Arbeitssystem \hat{l} [GE]/[ME]
$c_{izs}^{Transp-Z}$	Variable Transportkosten für den Transport von Produkt i von Zulieferer z zum Produktionsstandort s [GE]/[ME]
$c_{iv\hat{v}\tau a}^{Transp-T}$	Variable Transportkosten für ein Produkt i von Knoten v zu Knoten \hat{v} von Spediteur τ bei Bestellfrequenz a [GE]/[ME]
$c_{ilpn}^{Var-I-P}$	Variable Produktionskosten von Produkt i auf Arbeitssystem l mit Produktionskonzept p in Kapazitätsstufe n [GE]/[ME]
$c_{izd}^{Var-I-Z}$	Preis für Produkt i bei Zulieferer z in Rabattstufe d [GE]/[ME]
$c_{ij}^{Var-I-J}$	Variable Lagerkosten für Produkt i in Lager j [GE]/[ME]
$c_{ijo}^{Var-O-J}$	Variable Kosten für die Durchführung von Operation o für Produkt i in Lager j [GE]/[ME]
d_a^{AnzL}	Anzahl an Lieferungen je Periode bei Anlieferfrequenz a

$d_{i\hat{i}}^{BOM}$	Menge von Produkt i , die zur Produktion einer Mengeneinheit von Produkt \hat{i} benötigt werden [ME]/[ME]
d_{izt}^{l-Z}	Anzahl von Produkten i die in Periode t von Zulieferer z bezogen werden [ME]
d_{imt}^{NF-M}	Nachfrage nach Produkt i in Absatzmarkt m in Periode t [ME]
d_{ist}^{NF-S}	Bedarf für Produkt i an Standort s in Periode t [ME]
d_{iozt}^{OB}	Anzahl an Komponenten i , für die Operation o für Standort s in Periode t durchgeführt werden muss [ME]
d_{is}^{SB}	Sicherheitsbestand von Komponente i für Produktionsstandort s [ME]
$d_{\tau}^{TM-Init}$	Anzahl an Transportmitteln zu Beginn des Betrachtungszeitraums bei Spediteur τ [ME]
$d_{iv\hat{v}t}^{Transp-T}$	Transportmenge von Produkt i von Knoten v nach Knoten \hat{v} in Periode t [ME]
$k_i^{AnzZ-Min}$	Minimale Anzahl an Lieferanten pro Periode für Produkt i
$k_i^{AnzZ-Max}$	Maximale Anzahl an Lieferanten pro Periode für Produkt i
k_{ia}^{Bed-A}	Kapazitätsbedarf eines Produktes i bei Transportfrequenz a [KE]/[ME]
k_{ilp}^{Bed-P}	Kapazitätsbedarf des Produktes i auf Arbeitssystem l im Produktionskonzept p [KE]/[ME]
k_i^{Bed-l}	Kapazitätsbedarf eines Produktes i [KE]/[ME]
$k_{iz}^{Best-Min}$	Minimale Bestellmenge je Periode für das Produkt i bei Zulieferer z [ME]
$k_{iz}^{Best-Max}$	Maximale Bestellmenge je Periode für das Produkt i bei Zulieferer z [ME]
k_{izd}^{D-Min}	Minimale Anzahl an zu kaufenden Produkten i bei Zulieferer z um Rabattstufe d in Anspruch nehmen zu können [ME]
k_{jt}^J	Kapazität des Lagers j in Periode t [KE]
k_{jn}^{J-N}	Kapazität des Lagers j in Kapazitätsstufe n [KE]
k_{jo}^{J-O}	Kapazität des Lagers j für Operation o [KE]
k_{lpn}^P	Verfügbare Kapazität von Arbeitssystem l mit Produktionskonzept p in Kapazitätsstufe n [KE]
k_{ilp}^{RLV}	Kapazität, die für Rüstvorgänge und die damit verbundenen Losanlaufverluste für Komponente i in Arbeitssystem l mit Produktionskonzept p benötigt wird [KE]
k_{τ}^{TM}	Kapazität eines Transportmittels bei Spediteur τ [KE]
k_z^Z	Gesamtkapazität eines internen Zulieferers [KE]
$k_{\tau n}^T$	Kapazität von Spediteur τ in Kapazitätsstufe n [KE]

q_t	Diskontierungsfaktor in Periode t
$t_{\tau}^{LZT-Min}$	Minimale Vertragslaufzeit für Verträge mit Spediteur τ
$t_{\tau}^{LZT-Max}$	Maximale Vertragslaufzeit für Verträge mit Spediteur τ
$t_{iz}^{LZZ-Min}$	Minimale Vertragslaufzeit für Verträge mit Zulieferer z bezüglich Produkt i
$t_{iz}^{LZZ-Max}$	Maximale Vertragslaufzeit für Verträge mit Zulieferer z bezüglich Produkt i
$t^{Periode}$	Zeiteinheiten in einer Periode [ZE]
$t_{\tau v \hat{v}}^{Transp}$	Dauer des Transports für Spediteur τ auf Kante (v, \hat{v}) [ZE]
u_j^{Kapa}	Korrekturfaktor, der für jedes Lager j angibt, wie viel Prozent der maximalen gleichzeitig eintreffenden Menge an Komponenten in Lager j als Kapazität vorgehalten werden müssen
z_{il}^{Init-L}	Binärparameter, der angibt, ob Produkt i zu Beginn des Planungszeitraums Arbeitssystem l zugeordnet ist
z_{lpn}^{Init-P}	Binärparameter, der angibt, ob Produktionskonzept p mit Kapazitätsstufe n auf Arbeitssystem l zu Beginn des Planungszeitraums zugeordnet ist
z_j^{J-KBK}	Binärparameter, der angibt, ob Kapitalbindungskosten für Lager j anfallen

Variablen

$X_{ijost}^{J-I-O-S}$	Anzahl der Operationsdurchführungen o in Lager j für Produkt i , das an Standort s erbaut wird, in Periode t [ME]; $\forall i, j, o \in O_j^J, s, t$
X_{ilt}^{Prod}	Produktionsmenge von Produkt i auf Arbeitssystem l in Periode t [ME]; $\forall i, l \in L_i^{Pos}, t > 0$
X_{ilpnt}^{ProdD}	Produktionsmenge von Produkt i auf Arbeitssystem l mit Produktionskonzept p mit Kapazitätsstufe n in Periode t [ME]; $\forall i, l, p, n \in N_{lp}^{Pos-P}, t > 0$
X_{ijst}^{SB}	Sicherheitsbestand für Produkt i in Lager j für Produktionsstandort s in Periode t [ME]; $\forall i, j, s \in V_j^{Transp}, t > 0$
X_{imt}^{SK}	Unerfüllte Nachfrage nach Produkt i in Absatzmarkt m in Periode t [ME]; $\forall i, m, t > 0$
$X_{\tau t}^{TM}$	Anzahl an Transportmitteln bei Spediteur τ , die in Periode t genutzt werden [ME]; $\forall \tau, t$
$X_{\tau t}^{TM-Neu}$	Anzahl an Transportmitteln im Spediteur τ , die in Periode t neu gekauft werden [ME]; $\forall \tau, t > 0$

$X_{iv\hat{v}at}^{Transp-J}$	Anzahl der Produkte i , die von Knoten v nach Knoten \hat{v} mit der Transportfrequenz a in Periode t geliefert werden [ME]; $\forall i, v, \hat{v} \in V_v^{Transp}, a, t > 0$
$X_{ilmt}^{Transp-M}$	Distributionsmenge von Produkt i von Arbeitssystem l zu Absatzmarkt m in Periode t [ME]; $\forall i, l, m \in M_{il}^{Distr}, t > 0$
$X_{i\hat{i}l\hat{l}t}^{Transp-P}$	Transportmenge von Produkt i von Arbeitssystem l zum Verbau in Produkt \hat{i} auf Arbeitssystem \hat{l} in Periode t [ME]; $\forall i, l, \hat{i}, \hat{l} \in L_{il}^{Transp}, t > 0$
$X_{iv\hat{v}\tau at}^{Transp-T}$	Anzahl der Produkte i , die von Knoten v nach Knoten \hat{v} in Spediteur τ mit der Transportfrequenz a in Periode t geliefert werden [ME]; $\forall i, v, \hat{v} \in V_v^{Transp}, \tau \in T_{v\hat{v}}^{Kante-T}, a \in A_\tau^T, t > 0$
$X_{izsdt}^{Transp-Z}$	Anzahl der Produkte i , die von Zulieferer z an Standort s bei Rabattstufe d in Periode t geliefert werden [ME]; $\forall i, z \in Z_i^I, s, d \in D_{iz}^{Pos-I-Z}, t > 0$
Y_j^J	Binärvariable, die angibt, ob Lager j im Planungszeitraum genutzt wird; $\forall j$
$Y_{ijost}^{J-I-O-S}$	Binärvariable, die angibt, ob Operation o in Lager j für Produkte i , die an Standort s Verbaut werden, in Periode t durchgeführt wird; $\forall i, j, o \in O_j^J, s, t$
$Y_{jn\hat{n}t}^{J-KW}$	Binärvariable, die angibt, ob in Periode t in Lager j die Kapazitätsstufe von n nach \hat{n} gewechselt wird; $\forall j, n \in N_j^{Pos-J}, \hat{n} \in N_j^{Pos-J}, t > 0$
Y_{jnt}^{J-N}	Binärvariable, die angibt, ob Lager j in Periode t in Kapazitätsstufe n genutzt wird; $\forall j, n \in N_j^{Pos-J}, t$
Y_{jot}^{J-O}	Binärvariable, die angibt, ob Operation o in Periode t in Lager j durchgeführt wird; $\forall j, o \in O_j^J, t$
$Y_{jot}^{J-O-Neu}$	Binärvariable, die angibt, ob Operation o in Periode t in Lager j erstmalig durchgeführt wird; $\forall j, o \in O_j^J, t > 0$
Y_{ilpt}^P	Binärvariable, die angibt, ob Produkt i Arbeitssystem l mit Produktionskonzept p in Periode t zugeordnet ist; $\forall i, l \in L_i^{Pos}, p, t$
Y_{ilpt}^{P-KW}	Binärvariable, die angibt, ob Produkt i Arbeitssystem l mit Produktionskonzept p in Periode t neu zugeordnet wird; $i, l \in L_i^{Pos}, p, t > 0$
Y_{lpnt}^{P-L}	Binärvariable, die angibt, ob Kapazitätsstufe n in Periode t auf Arbeitssystem l mit Produktionskonzept p aktiv sind; $\forall l, p, n \in N_{lp}^{Pos}, t$

$Y_{lpn\hat{n}t}^{P-L-KW}$	Binärvariable, die angibt, ob in Periode t im Arbeitssystem l mit Produktionskonzept p von Kapazitätsstufe n zu Kapazitätsstufe \hat{n} gewechselt wird; $\forall l, p, n \in N_{lp}^{Pos}, \hat{n} \in N_{lp}^{Pos}, t > 0$
Y_{ijst}^{SB}	Binärvariable, die angibt, ob in der Sicherheitsbestand von Produkt i für den Produktionsstandort s in Periode t in Lager j bereitgehalten wird; $\forall i, j, s \in V_j^{Transp}, t$
$Y_{iv\hat{v}at}^{Transp-J}$	Binärvariable, die angibt, ob Produkt i in Periode t von Knoten v nach Knoten \hat{v} mit der Transportfrequenz a transportiert wird; $\forall i, v, \hat{v} \in V_v^{Transp}, a, t > 0$
$Y_{v\hat{v}\tau at}^{Transp-T}$	Binärvariable, die angibt, ob Produkt i in Periode t von Knoten v nach Knoten \hat{v} im Spediteur τ mit der Transportfrequenz a transportiert wird; $\forall v, \hat{v} \in V_v^{Transp}, \tau \in T_{v\hat{v}}^{Kante-T}, a \in A_\tau^T, t > 0$
Y_{izdt}^{Z-D}	Binärvariable, die angibt, ob für Produkt i in Periode t die Rabattstufe d von Zulieferer z genutzt wird; $\forall i, z \in Z_i^I, d \in D_{iz}^{Pos-I-Z}, t > 0$
Y_{zt}^Z	Binärvariable, die angibt, ob in Periode t eine Geschäftsbeziehung mit Zulieferer z besteht; $\forall z, t$
Y_{izt}^{Z-I}	Binärvariable, die angibt, ob in Periode t eine Geschäftsbeziehung mit Zulieferer z bzgl. Produkt i besteht; $\forall i, z \in Z_i^I, t$
Y_{zt}^{Z-Neu}	Binärvariable, die angibt, ob in Periode t eine Geschäftsbeziehung mit Zulieferer z eingegangen wird; $\forall z, t > 0$
$Y_{izt}^{Z-I-Neu}$	Binärvariable, die angibt, ob in Periode t eine Geschäftsbeziehung mit Zulieferer z bzgl. Produkt i eingegangen wird; $\forall i, z \in Z_i^I, t$
Y_τ^T	Binärvariable, die angibt, ob Spediteur τ im Planungszeitraum genutzt wird; $\forall \tau$
$Y_{tn\hat{n}t}^{T-KW}$	Binärvariable, die angibt, ob in Periode t ein Kapazitätswechsel von Stufe n zu Stufe \hat{n} für Spediteur τ erfolgt; $\forall \tau, n \in N_\tau^{Pos-T}, \hat{n} \in N_\tau^{Pos-T}, t > 0$
$Y_{\tau nt}^{T-N}$	Binärvariable, die angibt, ob Spediteur τ in Periode t in der Kapazitätsstufe n genutzt wird; $\forall \tau, n \in N_\tau^{Pos-T}, t$

Planung und Bewertung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung

Indextmengen

I_α^A Menge an Produkten i , die Arbeitsvorgang α benötigen

I_c^C	Menge an Produkten i , die bereits Cluster c zugeordnet sind
W_α^{Pos-A}	Menge an Arbeitsplätzen w , denen Arbeitsvorgang α zugeordnet werden kann

Parameter

d_{ii}^{Dist}	Distanz zwischen Auftrag i und Auftrag \hat{i}
d_{tw}^{T-W}	Anzahl an Aufträgen, die eine bestimmte Bearbeitungszeit t an Arbeitsplatz w benötigen [ME]
d_{cw}^{C-W}	Anzahl an Aufträgen, deren Bearbeitungszeit an Arbeitsplatz w innerhalb des Cluster-Zeitintervalls c liegt [ME]
$t_w^{Durch-W}$	Durchschnittliche Bearbeitungszeit der Aufträge an Arbeitsstation w [ZE]
$t_\alpha^{Bearb-A}$	Bearbeitungszeit von Arbeitsvorgang α [ZE]
t_{cw}^{CZ-W}	Bearbeitungszeit des Clusterzentrums von Cluster c auf Arbeitsplatz w [ZE]
t_w^{Kapa-W}	Kapazität von Arbeitsplatzes w für die Bearbeitung eines Auftrags (Vielfaches der Taktzeit) [ZE]
$t_w^{\ddot{U}T-lin}$	Linearer Übertakt auf Arbeitsplatz w [ZE]
$t_w^{\ddot{U}T-quad}$	Quadratischer Übertakt auf Arbeitsplatz w [ZE] ²
$t_{iw}^{Bearb-I-W}$	Bearbeitungszeit von Auftrag i an Arbeitsplatz w [ZE]
t_c^{C-Min}	Untere Schranke für das Zeitintervall von Cluster c [ZE]
t_c^{C-Max}	Obere Schranke für das Zeitintervall von Cluster c [ZE]
$u_{\alpha w}^{AIA}$	AIA-Kennzahl für Arbeitsvorgang α auf Arbeitsplatz w
$u_\alpha^{Baurate}$	Baurate von Arbeitsvorgang α
u_w^{TA}	Prozentualer Taktausgleich von Arbeitsplatz w bezogen auf die Kapazität des Arbeitsplatzes
$u_w^{\ddot{U}T-lin}$	Linearer Übertakt von Arbeitsplatz w bezogen auf die Kapazität des Arbeitsplatzes
$u_w^{\ddot{U}T-quad}$	Quadratischer Übertakt von Arbeitsplatz w bezogen auf die Kapazität des Arbeitsplatzes
u^{P-CD}	Gewichtung der Ressourcen bei der Distanzberechnung
$z_{i\rho}^{I-P}$	Binärparameter, der angibt, ob Ressource ρ für Produkt i benötigt wird

Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik

Indexmengen

I_i^{Set}	Menge aller Komponenten \hat{i} , die für die Erstellung der Set-Komponente i benötigt werden
J_j^{Alt}	Menge aller Lagersysteme \hat{j} , die alternativ zu j aktiviert werden können
J_e^E	Menge der Lagersysteme j , die sich auf Ebene e befinden
J_{io}^O	Menge aller Lagersysteme j , welche die Operation o für die Komponenten i durchführen können
O_{it}^{EX}	Menge aller Operationen o , welche für die Komponenten i in Periode t exklusiv zugeordnet werden müssen
O_t^{GEX}	Menge aller Operationen o , die in Periode t exklusiv zugeordnet werden
O_t^{GNEX}	Menge aller Operationen o , die in Periode t nicht exklusiv zugeordnet werden
O_{it}^{NEX}	Menge aller Operationen o , welche für die Komponenten i in Periode t nicht exklusiv zugeordnet werden müssen
O_o^{Seq}	Menge aller Operationen \hat{o} , die zur Ausführung von Operation o auf dem gleichen oder einem vorherigen bereits aktiviertem System ausgeführt worden sein müssen
O_o^{Zus}	Menge aller Operationen \hat{o} , die zur Ausführung von Operation o auf einem System zur einer gewissen Menge auf dem gleichen System ausgeführt werden müssen
$R_{\tau jj}^{Trans}$	Menge der Routen r des Transportsystems τ , die die Lagersysteme j und \hat{j} verbinden
R_τ^T	Menge aller Routen r , die für das Transportsystem τ aktiviert werden können
$R_{\tau r}^{Alt}$	Menge aller Routen \hat{r} auf Transportsystem τ , die alternativ zu Route r auf Transportsystem τ aktiviert werden können
T^{US}	Menge aller unstetigen Transportsysteme
T_{io}^O	Menge aller Transportsysteme τ , welche die Operation o für die Komponenten-Ladungsträger Kombination ig durchführen können
T_τ^{Alt}	Menge aller Transportsysteme $\hat{\tau}$, die alternativ zu τ aktiviert werden können

Parameter

$bigM$	Sehr große Zahl
c_j^{EK-J}	Einmalige Kosten für die Aktivierung des Lagersystems j [GE]
c_{jo}^{EK-J-O}	Einmalige Kosten für die Aktivierung einer Operation o des Lagersystems j [GE]
$c_{\tau r}^{EK-R}$	Einmalige Kosten für die Aktivierung einer Route r des Transportsystems τ [GE]
c_{τ}^{EK-T}	Einmalige Kosten für die Aktivierung des Transportsystems τ [GE]
$c_{\tau o}^{EK-T-O}$	Einmalige Kosten für die Aktivierung einer Operation o des Lagersystems τ [GE]
$c_{\tau}^{EK-T-US}$	Einmalige Kosten für die Aktivierung eines Transportmittels des Transportsystems τ [GE]
c_j^{Fix-J}	Fixkosten für die Aktivierung des Lagersystems j [GE]
$c_{jo}^{Fix-J-O}$	Fixkosten für die Aktivierung einer Operation o des Lagersystems j [GE]
$c_{\tau r}^{Fix-R}$	Fixkosten für die Aktivierung einer Route r des Transportsystems τ [GE]
c_{τ}^{Fix-T}	Fixkosten für die Aktivierung des Transportsystems τ [GE]
$c_{\tau o}^{Fix-T-O}$	Fixkosten für die Aktivierung einer Operation o des Lagersystems τ [GE]
$c_{\tau}^{Fix-T-US}$	Fixkosten für die Aktivierung eines Transportmittels des Transportsystems τ [GE]
c_{ijj}^{Transp}	Transportkosten für den Transport einer Komponente i von Lagersystem j nach Lagersystem \hat{j} [GE]/[ME]
$c_{ioj}^{Var-J-O}$	Variable Kosten des Lagersystems j für die Durchführung der Operation o für eine Mengeneinheit der Komponente i [GE]
$c_{io}^{Var-J-O-G}$	Variable Kosten für die Durchführung der Operation o für eine Mengeneinheit der Komponente i auf Lagersystemen [GE]
$c_{io}^{Var-O-Ext}$	Variable Kosten für die externe Durchführung der Operation o für eine Mengeneinheit der Komponente i [GE]
c_{τ}^{Var-T}	Variable Kosten für den Transport mit Transportsystem τ
$c_{io\tau}^{Var-T-O}$	Variable Kosten des Transportsystems τ für die Durchführung der Operation o für eine Mengeneinheit der Komponente i [GE]
$c_{io}^{Var-T-O-G}$	Variable Kosten für die Durchführung der Operation o für eine Mengeneinheit der Komponente i auf Transportsystemen [GE]
d_{it}	Bedarf an Komponente i in Periode t [ME]

d_{iot}^{OEX}	Anzahl der Durchführung der exklusiven Operation o die für Komponente i in Periode t benötigt wird [ME]
d_{iot}^{ONEX}	Anzahl der Durchführung der nicht-exklusiven Operation o die für Komponente i in Periode t benötigt wird [ME]
$d_{io\hat{o}}^{Zus-EX}$	Anzahl benötigter Operationsbelegungen der Operation \hat{o} zur Durchführung aller Operationen o auf dem gleichen System für die Komponente i [KE]
$d_{io\hat{o}}^{Zus-NEX}$	Verhältnis zwischen den zur Durchführung von Operation o benötigten Operationsbelegungen der Operation \hat{o} und den Operationsbelegungen von Operationen o auf dem gleichen System für die Komponente i
d_{τ}^{Tmax}	Maximale Anzahl an Transportmitteln für das Transportsystem τ [ME]
k_i^{Bed-l}	Kapazitätsbedarf einer Einheit der Komponente i beim Transport in einem stetigen Transportmittel [KE]/[ME]
$k_{ioj}^{Bed-O-J}$	Kapazitätsbedarf einer Einheit der Komponente i für Operation o auf Lagersystem j [KE]/[ME]
$k_{io\tau}^{Bed-O-T}$	Kapazitätsbedarf einer Einheit der Komponente i für Operation o auf Transportsystem τ [KE]/[ME]
k_{jo}^{J-O}	Kapazität des Lagersystems j für Operation o [KE]
k_o^{J-O-G}	Kapazität aller Lagersysteme für Operation o [ME]
k_{io}^{O-Ext}	Kapazität des Zulieferers für die Durchführung der Operation o für Komponente i [KE]
$k_{\tau o}^{T-O}$	Kapazität des Transportsystems τ für Operation o [KE]
k_o^{T-O-G}	Kapazität aller Transportsysteme für Operation o [ME]
$k_{\tau r}^{T-R}$	Kapazität des Transportsystems τ auf Route r [KE]
k_{τ}^{T-US}	Kapazität eines Transportmittels des Transportsystems τ [KE];
t_{τ}^{Bearb}	Gemittelte Bearbeitungszeit eines Transportmittels des Transportsystems τ beim Transport eines Ladungsträgers [ZE]/[ME]
$t_{\tau r}^{Fahrz}$	Gemittelte Fahrzeit eines Transportmittels des Transportsystems τ für die Route r (inkl. gemittelter Stopps) [ZE]
$t_{\tau o}^{T-O}$	Gemittelte Zeit zur Durchführung einer Kapazitätseinheit der Operation o auf dem Transportsystem τ [ZE/KE]
t_{τ}^{T-US}	Zeit, die ein Transportmittel von Transportsystem τ im Planungszeitraum genutzt werden kann [ZE]
$u_{\tau r}^{Leerf}$	Zuschlagsfaktor auf Transport- und Bearbeitungszeiten für Leerfahrten
$Z_{ij\hat{j}t}^{Transp}$	Binärparameter, der angibt, ob Komponente i von Lagersystem j nach Lagersystem \hat{j} in Periode t transportiert wird

Variablen

$X_{iot}^{O^{NEX-Ext}}$	Anzahl der extern durchgeführten nicht exklusiven Operationen o für die Komponente i in Periode t [ME]; $\forall i, t, o \in \{O^{GNEX} \cap O_i^{Ext}\}$
$X_{iojt}^{O^{NEX-J}}$	Anzahl der von Lagersystem j durchgeführten nicht exklusiven Operation o in Periode t für die Komponente i [ME]; $\forall i, t, o \in O_t^{GNEX}, j \in J_{io}^O$
$X_{iot}^{O^{NEX-J-G}}$	Anzahl von Komponenten i , für die die nicht exklusiven Operation o auf Lagersystemen in Periode t durchgeführt wird [ME]; $\forall i, t, o \in \{O_t^{GNEX} \cap O_i^{I-J}\}$
$X_{io\tau t}^{O^{NEX-T}}$	Anzahl der von Transportsystem τ durchgeführten nicht exklusiven Operation o für die Komponente i in Periode t [ME]; $\forall i, t, o \in O_t^{GNEX}, \tau \in T_{io}^O$
$X_{iot}^{O^{NEX-T-G}}$	Anzahl von Komponenten i , für die die nicht exklusiven Operation o auf Transportsystemen durchgeführt wird in Periode t [ME]; $\forall i, o \in \{O_t^{GNEX} \cap O_i^{I-T}\}$
$X_{\tau t}^{TM}$	Anzahl benötigter Transportmittel für Transportsystem τ in Periode t [ME]; $\forall \tau, t$
$X_{\tau t}^{TM-Neu}$	Anzahl neuer Transportmittel für Transportsystem τ in Periode t [ME]; $\forall \tau, t$
Y_{ijt}^{I-J}	Komponentenbelegung: 1, falls Lagersystem j durch Komponente i in Periode t genutzt wird, sonst 0; $\forall i, j, t$
$Y_{i\tau t}^{I-T}$	Komponentenbelegung: 1, falls Transportsystem τ durch Komponente i in Periode t genutzt wird, sonst 0; $\forall i, \tau, t$
Y_{jt}^J	Binärvariable, die angibt, ob Lagersystem j in Periode t aktiviert ist; $\forall j, t$
Y_{jt}^{J-Neu}	Binärvariable, die angibt, ob Lagersystem j in Periode t das erste Mal genutzt wird; $\forall j, t$
Y_{jot}^{O-J}	Binärvariable, die angibt, ob Operation o für Lagersystem j in Periode t aktiviert ist; $\forall j, o \in O_j^J, t$
$Y_{jot}^{O-J-Neu}$	Binärvariable, die angibt, ob Operation o für Lagersystem j in Periode t das erste Mal genutzt wird; $\forall j, o \in O_j^J, t$
$Y_{\tau ot}^{O-T}$	Binärvariable, die angibt, ob Operation o für Transportsystem τ in Periode t aktiviert ist; $\forall \tau, o \in O_\tau^T, t$
$Y_{\tau ot}^{O-T-Neu}$	Binärvariable, die angibt, ob Operation o für Transportsystem τ in Periode t das erste Mal genutzt wird; $\forall \tau, o \in O_\tau^T, t$
$Y_{iot}^{O^{EX-Ext}}$	Binärvariable, die angibt, ob die exklusive Operation o in Periode t extern für Komponente i durchgeführt wird; $\forall i, t, o \in \{O^{GNEX} \cap O_i^{Ext}\}$

Y_{iojt}^{OEX-J}	Binärvariable, die angibt, ob Lagersystem j die exklusive Operation o für Komponente i in Periode t durchführt; $\forall i, t, o \in O_t^{GNEX}, j \in J_{io}^O$
$Y_{iot}^{OEX-J-G}$	Binärvariable, die angibt, ob die exklusive Operation o für Komponente i auf Lagersystemen in Periode t durchführt; $\forall i, t, o \in \{O_t^{GNEX} \cap O_i^{I-J}\}$
$Y_{io\tau t}^{OEX-T}$	Binärvariable, die angibt, ob Transportsystem τ die exklusive Operation o für die Komponente i in Periode t durchführt; $\forall i, t, o \in O_t^{GNEX}, \tau \in T_{io}^O$
$Y_{io\tau t}^{OEX-T-G}$	Binärvariable, die angibt, ob die exklusive Operation o für die Komponente i auf Transportsystemen in Periode t durchführt; $\forall i, o \in \{O_t^{GNEX} \cap O_i^{I-T}\}$
$Y_{i\tau r t}^R$	Binärvariable, die angibt, ob Transportsystem τ Komponente i auf Route r in Periode t transportiert; $\forall i, \tau, r \in R_\tau^T, t$
Y_{ijjt}^{Transp}	Binärvariable, die angibt, ob, ob Komponente i von Lagersystemen j nach Lagersystem \hat{j} in Periode t transportiert wird; $i, t, j, \hat{j} \in J_j^{Ttransp}$
$Y_{\tau t}^T$	Binärvariable, die angibt, ob Transportsystem τ in Periode t aktiviert ist; $\forall \tau, t$
$Y_{\tau t}^{T-Neu}$	Binärvariable, die angibt, ob Transportsystem τ in Periode t das erste Mal genutzt wird; $\forall \tau, t$
$Y_{\tau r t}^{T-R}$	Binärvariable, die angibt, ob Route r auf Transportsystem τ in Periode t aktiviert ist; $\forall \tau, t, r \in R_\tau^T$
$Y_{\tau r t}^{T-R-Neu}$	Binärvariable, die angibt, ob Route r auf Transportsystem τ in Periode t das erste Mal genutzt wird; $\forall \tau, t, r \in R_\tau^T$

Hierarchisches Vorgehen

Indexmengen

I^{Eigen}	Menge an Komponenten i , die auf jeden Fall selber produziert werden müssen
I^{PNW}	Menge an Komponenten i , die im Produktionsnetzwerk verteilt werden müssen
I^{ZL}	Menge an Lagern j , die nicht in der Strukturierung und Dimensionierung der internen Produktionslogistik näher untersucht werden sollen
I^{Zukauf}	Menge an Komponenten i , die ggf. eingekauft werden können
L^{FL}	Menge der Arbeitssysteme l mit Fließlinienfertigung

L_s^{Pos-S}	Mögliche Arbeitssysteme an Standort s
O_{ilt}^{I-L}	Menge aller Operationen o , die für Komponente i an Arbeitssystem l in Periode t durchgeführt werden müssen
O_{is}^{I-S}	Menge aller Operationen o , die für Komponente i immer an Standort s durchgeführt werden müssen
Z^{Ext}	Menge an externen Zulieferern
Z_l^L	Menge an Montagelinien ζ , die sich in Arbeitssystem l befinden

Parameter

C_{ijo}^{EK-J-O}	Einmalige Kosten für die technischen Einrichtungen für die Durchführung von Operation o für Produkt i in Lager j [GE]
C_ρ^{EK-P}	Einmalkosten für eine Ressource ρ [GE]
C_{ij}^{I-J}	Lagerkosten einer Komponente i in Lagerstandort j [GE]/[ME]
$C_{ij}^{I-J-KBK}$	Kapitalbindungskosten einer Komponente i in Lagerstandort j [GE]/[ME]
C_{ij}^{I-J-LK}	Lagerkosten einer Komponente i in Lagerstandort j (ohne Kapitalbindungskosten und Operationskosten) [GE]/[ME]
C_{ij}^{I-J-OK}	Operationskosten einer Komponente i in Lagerstandort j [GE]/[ME]
C_ρ^{Fix-P}	Fixkosten für eine Ressource ρ [GE]
$C_{iv\hat{v}a}^{Transp-J-Var}$	Variable Transportkosten für ein Produkt i von Knoten v zu Knoten \hat{v} bei Bestellfrequenz a [GE]/[ME]
$C_{iv\hat{v}a}^{Transp-J-IS}$	Anteilige Einmal- und Fixkosten für den Transport eines Produkts i von Knoten v zu Knoten \hat{v} bei Bestellfrequenz a bei internen Speditionen [GE]/[ME]
$C_{iv\hat{v}a}^{Transp-J-ES}$	Anteilige Einmal- und Fixkosten für den Transport eines Produkts i von Knoten v zu Knoten \hat{v} bei Bestellfrequenz a bei externen Speditionen [GE]/[ME]
$C_{io}^{Var-J-O-G}$	Variable Kosten für die Durchführung von Operation o für Produkt i in allen Lagersystemen eines Lager- oder Produktionsstandort [GE]/[ME]
d_{lpt}	Anzahl der zur Verfügung stehenden Ressourcen ρ in Arbeitssystem l in Periode t [ME]
u_{ip}^{I-P-EK}	Faktor, der für angibt, wie viel Prozent der Einmalkosten für Produktionskonzept p Produkt i zugerechnet werden
u_{ip}^{I-P-FK}	Faktor, der für angibt, wie viel Prozent der Fixkosten für Produktionskonzept p Produkt i zugerechnet werden

$u_{i\hat{v}\tau}^{Kante-T}$	Faktor, der für jede Kante $v\hat{v}$ und jeden Spediteur τ angibt, wie viel Prozent der Transportkosten Produkt i zugerechnet werden
u_{ij}^{I-J}	Faktor, der für jedes Lager j angibt, wie viel Prozent der Einmal- und Fixkosten Produkt i zugeordnet werden
u_{ij}^{I-J-O}	Faktor, der für jedes Lager j angibt, wie viel Prozent der Einmal- und Fixkosten für Operationen Produkt i zugeordnet werden
u_{io}^{I-O}	Anteil der Kosten für Operation o , die Produkt i zugerechnet werden
$u_{i\tau}^{I-T}$	Anteil der Kosten für Transportsystem τ , die Produkt i zugerechnet werden
z_{ilt}^L	Binärparameter, der angibt, ob Komponente i Arbeitssystem l in Periode t zugeordnet ist

Variablen

$Y_{ib\zeta t}^Z$	Binärvariable, die angibt, ob Produkt i mit Ausstattungsmerkmal b in Periode t der Montagelinie ζ zugeordnet ist
$Y_{\zeta awt}^A$	Binärvariable, die angibt, ob Arbeitsvorgang α in Periode t dem Arbeitsplatz w der Montagelinie ζ zugeordnet ist
$Y_{\zeta\rho t}^{Z-P-Neu}$	Binärvariable, Ressource ρ auf Linie ζ in Periode t benötigt wird