

Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten  
Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte  
in der Montage



**Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von  
getakteten Fließproduktionssystemen für  
variantenreiche Serienprodukte in der Montage**

Dissertation zu Erlangung der Würde eines  
Doktors der Wirtschaftswissenschaften (Dr. rer. pol.)  
der Universität Paderborn

vorgelegt von

Dipl.-Wirt.-Ing. Jan Erik Gans  
Fröbelstr. 8  
33100 Paderborn

Paderborn , 7. November 2008

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. W. Dangelmaier  
Zweitprüferin: Prof. Dr. L. Suhl

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Problembeschreibung .....</b>	<b>4</b>
2.1 Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes .....	4
2.1.1 Eigenschaften von Fließproduktionslinien in der Montage .....	4
2.1.2 Arbeitskosten in variantenreichen Fließproduktionslinien .....	8
2.1.2.1 Bestimmung von Arbeitskosten bei geschlossenen Stationsgrenzen .....	8
2.1.2.2 Bestimmung von Arbeitskosten bei offenen Stationsgrenzen .....	9
2.1.3 Investitionskosten in variantenreichen Fließproduktionslinien .....	11
2.2 Aufgaben der Strukturplanung von getakteten Fließproduktionssystemen .....	13
2.2.1 Strukturplanung bei geschlossenen Stationsgrenzen .....	18
2.2.2 Strukturplanung bei offenen Stationsgrenzen .....	26
2.2.3 Strukturplanung von verteilten Fließproduktionssystemen unter Unsicherheit....	28
2.3 Anforderungen an die Verfahren zur Strukturplanung .....	33
2.3.1 Anforderungen an ein Verfahren zur Planung von Fließproduktionsstrukturen bei geschlossenen Stationsgrenzen .....	33
2.3.2 Anforderungen an ein Verfahren zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen .....	34
2.3.3 Anforderungen an ein Verfahren zur Planung von verteilten Fließproduktionssystemstrukturen unter Unsicherheit .....	35
<b>3 Stand der Technik .....</b>	<b>37</b>
3.1 Stand der Technik zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen bei geschlossenen Stationsgrenzen .....	37
3.1.1 Vorhandene Verfahren zur Montageplanung.....	37
3.1.1.1 Leitfäden zur Montage- und Fabrikplanung.....	37
3.1.1.2 Das Cellular Manufacturing Problem.....	38
3.1.1.3 Dittmayer.....	38
3.1.1.4 Koether .....	39
3.1.1.5 Schmidt.....	39
3.1.1.6 Kratzsch.....	39
3.1.1.7 Gottschalk.....	39
3.1.1.8 Zeile .....	40
3.1.1.9 Müller .....	40
3.1.1.10 Merz.....	40
3.1.1.11 Nachtwey et al .....	41
3.1.1.12 Nöth .....	41

3.1.2 Mathematische Programmierung als Lösungsansatz für Entscheidungsprobleme.....	41
3.2 Stand der Technik zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen.....	42
3.2.1 Ansätze der Maschinenbelegungsplanung.....	43
3.2.2 Ansätze der Clusteranalyse.....	45
3.2.2.1 Hierarchische Verfahren .....	46
3.2.2.2 Partitionierende Verfahren .....	47
3.2.2.3 Exakte Verfahren .....	48
3.2.2.4 Genetische Algorithmen.....	49
3.3 Stand der Technik zur Anpassungsplanung von verteilten Fließproduktionssystemstrukturen unter Unsicherheit .....	50
3.3.1 Entwicklung von Nachfrageszenarien.....	50
3.3.2 Anpassungsplanung von Montagesystemen.....	51
3.3.2.1 Lotter et. al .....	51
3.3.2.2 Feldmann et al .....	52
3.3.2.3 Krüger .....	52
3.3.2.4 Schuh et al.....	52
3.3.3 Anpassungsplanung in der Netzwerkplanung .....	52
3.3.3.1 Zäpfel .....	53
3.3.3.2 Ferber .....	53
3.3.3.3 Tonigold .....	53
3.3.3.4 Bundschuh.....	53
3.3.4 Zweistufige stochastische Verfahren.....	54
3.3.4.1 Laengle et al .....	56
3.3.4.2 Santoso et al .....	56
3.3.4.3 Friese .....	56
3.3.4.4 Bihlmaier et al.....	57
3.3.5 Heuristische Verfahren zur Lösung kombinatorischer Probleme.....	57
<b>4 Zu leistende Arbeiten.....</b>	<b>62</b>
4.1 Verfahren zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen bei geschlossenen Stationsgrenzen.....	62
4.2 Verfahren zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen.....	62
4.3 Verfahren zur Planung von verteilten Fließproduktionssystemstrukturen unter Unsicherheit .....	63
<b>5 Verfahren zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage .....</b>	<b>66</b>
5.1 Verfahren zur Neuplanung von mehrstufigen Fließproduktionssystemstrukturen bei geschlossenen Stationsgrenzen .....	66
5.1.1 Planung der horizontalen Teilung.....	66
5.1.2 Simultane Planung der vertikalen und horizontalen Teilung .....	78
5.2 Verfahren zur Neuplanung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen.....	80

5.3 Verfahren zur Anpassungsplanung von Fließproduktionssystemstrukturen unter Unsicherheit .....	91
5.3.1 Mathematische Formulierung des Anpassungsproblems .....	92
5.3.2 Lösungsheuristik .....	99
<b>6 Einbindung der Verfahren in ein Vorgehensmodell zur Planung von Fließproduktionssystemen in der Montage.....</b>	<b>104</b>
<b>7 Validierung der Verfahren an Beispielen .....</b>	<b>109</b>
7.1 Beispiel für eine Neuplanung bei geschlossenen Stationsgrenzen.....	109
7.1.1 Eingangsdaten.....	109
7.1.2 Ergebnisse.....	114
7.2 Beispiel für eine Neuplanung bei offenen Stationsgrenzen .....	120
7.2.1 Auftragszuordnung ohne Ressourceneinschränkungen .....	121
7.2.2 Auftragszuordnung mit Ressourceneinschränkungen.....	123
7.3 Beispiel für eine Anpassungsplanung unter Unsicherheit.....	125
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>131</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>134</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Teilungsformen eines mehrstufigen Fließproduktionssystems .....	2
Abbildung 2.1: Organisationstypen der Produktion.....	6
Abbildung 2.2: Taktverluste im Ein- und Mehr-Produktfall.....	9
Abbildung 2.3: Workerposition im Zeitverlauf bei offenen Stationsgrenzen .....	10
Abbildung 2.4: Einordnung der der Strukturplanung in den Planungsablauf .....	14
Abbildung 2.5: Aufgaben der Strukturplanung.....	15
Abbildung 2.6: Hierarchischer Aufbau der Montage.....	16
Abbildung 2.7: Kapazitätsfeld und Kapazitätsteilung.....	17
Abbildung 2.8: Aufteilung des Montageumfangs auf mehrere Montagesysteme.....	18
Abbildung 2.9: Parameter der Strukturplanung von Mehrliniensystemen.....	19
Abbildung 2.10: Kostenverläufe bei Aufbau von Parallellinien .....	21
Abbildung 2.11: Beispiel für die Ausgangssituation einer Kapazitätsteilung.....	22
Abbildung 2.12: Beispiel für eine horizontale Kapazitätsteilung .....	23
Abbildung 2.13: Beispiel für eine vertikale Kapazitätsteilung .....	24
Abbildung 2.14: Beispiel für einen alternativen vertikalen Trennpunkt.....	25
Abbildung 2.15: Zielsetzung der Varianzminimierung bei der Auftragszuordnung in Mehrliniensystemen mit offenen Stationsgrenzen .....	27
Abbildung 2.16: Auftragszuordnung bei beschränkter Baubarkeit der Aufträge.....	27
Abbildung 2.17. Determinanten der quantitativen Kapazität.....	29
Abbildung 2.18: Prinzip der Kapazitätsanpassung .....	30
Abbildung 2.19: Anpassung der Struktur und organisatorische Anpassung.....	31
Abbildung 2.20: Unsicherheit der Stückzahlverläufe .....	32
Abbildung 2.21: Zeitliche Zuordnung der entscheidungsrelevanten Kosten .....	32
Abbildung 3.1: Ablaufdiagramm des $k$ -means-Algorithmus .....	48
Abbildung 3.2: Einordnung der zweistufigen stochastischen Optimierung.....	54
Abbildung 3.3: Treffen von Entscheidungen unter Unsicherheit.....	55
Abbildung 3.4: Genereller Ablauf eines Genetischen Algorithmus.....	59
Abbildung 3.5: Stufendekomposition des hybriden Genetischen Algorithmus .....	59
Abbildung 3.6: Ablauf des allgemeinen hybriden Algorithmus .....	61
Abbildung 5.1: Austaktung einer Montagelinie mit zwei Produktvarianten.....	67
Abbildung 5.2: Beispiel für Montageabschnitte auf einer Linie .....	67
Abbildung 5.3: Montageabschnittszeiten für ein Beispiel mit zwei Produktvarianten .....	68
Abbildung 5.4: Prinziplayout zur Flächenberechnung.....	69
Abbildung 5.5: Beispiel der Kombinationsmöglichkeiten für Vor- und Endmontagebereiche für vier Montagebereiche .....	79
Abbildung 5.6: Algorithmus zur Bestimmung des optimalen Auf trennpunktes zwischen Vor- und Endmontage bei geschlossenen Stationsgrenzen .....	80
Abbildung 5.7: Algorithmus zur Auftragszuordnung ohne Ressourcenbeschränkungen .....	85
Abbildung 5.8: Zuordnen von Aufträgen durch Verschieben.....	87
Abbildung 5.9: Algorithmus zur Auftragszuordnung mit Ressourcenbeschränkungen.....	88
Abbildung 5.10: Algorithmus zur Auftragsverschiebung .....	89
Abbildung 5.11: Algorithmus MultiplesVerschieben .....	90

Abbildung 5.12: Zusammenhang zwischen der Genom-Matrix und der Solver-Information...	100
Abbildung 5.13: Funktion der Mutationsstrategien.....	102
Abbildung 5.14: Pseudocode des angepassten hybriden Genetischen Algorithmus für die Anpassungsplanung .....	103
Abbildung 6.1: Vorgehensmodell zur Planung von Fließproduktionssystemen in der Montage .....	105
Abbildung 7.1: Montagestrukturen der durchgeführten Versuchsreihen .....	112
Abbildung 7.2: Vergleich der Zeitspreizungen der Ausgangssituation (eine Montagelinie) ....	114
Abbildung 7.3: Vergleich der Montagesystemnutzungsgrade der Versuchreihe 1 .....	115
Abbildung 7.4: Vergleich der Montagesystemnutzungsgrade der Versuchreihe 2 .....	117
Abbildung 7.5: Vergleich der Zeitspreizungen der Montagestrukturen der Versuchsreihe 2 (Fall 2) .....	119
Abbildung 7.6: Vergleich der Vorteilhaftigkeit alternativer Strukturalternativen .....	120
Abbildung 7.7: Produkt- und Linienstruktur im Fallbeispiel .....	125
Abbildung 7.8: Stückzahlverlauf und Unsicherheitskorridor im Fallbeispiel .....	126
Abbildung 7.9: Vergleich der Rechenzeiten von exaktem Verfahren und Heuristik .....	129

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 7.1: Ressourcenbedarfe der Produktvarianten.....	110
Tabelle 7.2: Zuordnung der technischen Ressourcen zu Montageabschnitten .....	110
Tabelle 7.3: Montageabschnittszeiten der Produktvarianten .....	110
Tabelle 7.4: Investitionskosten der technischen Ressourcen .....	111
Tabelle 7.5: Investitionskosten für den Linienaufbau .....	111
Tabelle 7.6: Übersicht der Produktionsmengen .....	111
Tabelle 7.7: Schichtmodellparameter des Fallbeispiels .....	112
Tabelle 7.8: Minimaltaktzeiten für die Versuchsreihen .....	113
Tabelle 7.9: Übersicht über die Produktvariantenzuordnung für Versuchsreihe 1 .....	115
Tabelle 7.10: Ergebnisse der technischen Ressourcenzuordnung der Versuchsreihe 1 .....	116
Tabelle 7.11: Übersicht der Gesamtinvestitionskostenergebnisse der Versuchsreihe 1 .....	116
Tabelle 7.12: Übersicht über die Produktvariantenzuordnung für Versuchsreihe 2 .....	118
Tabelle 7.13: Kostenvergleich der Versuchsreihe 2 mit der Ausgangssituation.....	120
Tabelle 7.14: Ergebnisse der Experimente für den Algorithmus ohne Ressourceneinschränkungen.....	122
Tabelle 7.15: Ressourcenausstattung des vollflexiblen Montagesystems.....	123
Tabelle 7.16: Ressourcenausstattung des teilflexiblen Montagesystems.....	123
Tabelle 7.17: Ressourcenausstattung des beschränkten Montagesystems .....	124
Tabelle 7.18: Ergebnisse der Experimente für den Algorithmus mit Ressourceneinschränkungen.....	124
Tabelle 7.19: Kapazitäten der Montagelinien in den verschiedenen Zuständen .....	126
Tabelle 7.20. Kosten für Aufbau der Linien (Wechsel der technischen Stufe).....	127
Tabelle 7.21: Betriebskosten der Vormontagelinie 1 in Abhängigkeit der organisatorischen Stufe .....	127
Tabelle 7.22: Anpassungskosten bei Wechsel der organisatorischen Stufe der Vormontagelinie 1 .....	127
Tabelle 7.23: Transportkosten im Beispiel .....	127
Tabelle 7.24: Optimale Anpassungsstrategie für das Beispiel .....	128
Tabelle 7.25: Vergleich der Ergebnisse der Heuristik bei Änderung der Generationsanzahl....	128
Tabelle 7.26: Vergleich der Ergebnisse der Heuristik bei Änderung der Populationsgröße.....	129



# 1 Einleitung

Die frühe Existenz einer variantenreichen Serienproduktion zeigt sich eindrucksvoll bei der Betrachtung der Terrakottaarmee aus der Grabanlage des chinesischen Kaisers Qin Shihuangdis aus dem Jahre 210 v. Chr. Jede der über 7000 lebensgroßen Soldatenfiguren aus Ton, die in den Grabbauten aufgestellt sind, besitzt individuelle Gesichtszüge und Ausstattungsmerkmale. An den Figuren lässt sich erkennen, dass bei der Herstellung bereits Prinzipien der Serienfertigung angewendet wurden und eine Organisation des Produktionsprozesses in unterschiedliche Gewerke von der Gewinnung des Tons über die Formgebung bis zur Montage und Aufstellung der Figuren vorlag.<sup>1</sup>

Das Prinzip der variantenreichen Serienfertigung ist auch heute Grundlage vieler Industriezweige. Dabei sehen die Unternehmen die wachsende Variantenvielfalt zunehmend als Problem.<sup>2</sup> Eine Ursache für die Ausweitung des Variantenangebotes ist, dass sich die Unternehmen durch ein möglichst umfangreiches Variantenangebot von der Konkurrenz absetzen wollen, um auch in stagnierenden Märkten neue Kunden zu gewinnen.<sup>3</sup> Darüber hinaus führt die Internationalisierung des Absatzes dazu, dass die Produkte an die technischen, kulturellen und rechtlichen Rahmenbedingungen im Ausland angepasst werden müssen.<sup>4</sup> Ein weiterer Aspekt ist, dass sich die Individualisierung der Produkte auch durch den Ansatz des Mass Customization auf Marktbereiche ausgeweitet hat, die bisher der klassischen Massenproduktion vorbehalten waren.<sup>5</sup> Daher wird hier auch von einer Variantenfertigung gesprochen.<sup>6</sup>

Obwohl flexible Produktionstechnologien sowie leistungsfähige Planungs- und Steuerungssysteme zur Verfügung stehen, führt die Angebotsausweitung zu einer Komplexitätserhöhung an vielen Stellen des Produktionsprozesses, die eine effiziente Produktion erschwert.<sup>7,8</sup> In der Montage, üblicherweise der letzten Stufe der Produktion, herrscht in der Variantenproduktion in der Regel die Losgröße 1 vor. Dies liegt darin begründet, dass aufgrund der hohen Variantenzahl und Kundenindividualität eine Produktion auf Lager nicht praktikabel oder aufgrund der hohen Kapitalbindung in Fertigprodukten unerwünscht ist. Eine Möglichkeit, bei hohen Stückzahlen eine effiziente Montage zu ermöglichen, ist die Verwendung des Fließproduktionsprinzips. In einer solchen Fließmontage, in der nur Produkte hergestellt werden, für die ein expliziter Kundenauftrag vorliegt, treten dabei aufgrund der Variantenvielfalt verschiedene Probleme auf. Dazu gehören vor allem die Materialbereitstellung der Variantenteile und die schwankende

---

<sup>1</sup> Vgl. Ciarla (2006).

<sup>2</sup> Vgl. dazu die Untersuchungen von Lingnau (1994), S. 149ff.; Wildemann (2004), S.2; Kersten, S. 204 und Maune (2002), S.61f.

<sup>3</sup> Vgl. hierzu Lancaster (1990); Wildemann (1995), S. 21.; Lingnau (1994), S. 82f.

<sup>4</sup> Vgl. u.a. Schulte (1989), S. 60.

<sup>5</sup> Vgl. Piller (2006).

<sup>6</sup> Vgl. Rosenberg (1996).

<sup>7</sup> Vgl. Lingnau (1994), S. 84f.; Heina, J. (1999), S. 14f.

<sup>8</sup> Vgl. Maune (2002), S. 10.

Kapazitätsauslastung der Montagestationen. Während für die Materialbereitstellung leistungsfähige Logistikkonzepte zur Verfügung stehen, ist die Ausnutzung der Produktionskapazität weiterhin ein unzureichend gelöstes Problem. Durch die unterschiedlichen Bearbeitungszeiten für die Produkte an den einzelnen Arbeitsstationen kommt es zu Über- und Unterlastungen der Werker. Die Überlastungen können zu schlechterer Arbeitsausführung und damit zu Qualitätsproblemen führen oder einen Unterstützer- (Springer-) Einsatz notwendig machen. Im Fall von Unterlastungen kommt es dagegen zu Wartezeiten. Die durch Belastungsschwankungen verursachten Kosten in Fließproduktionslinien können auch unter dem Begriff der Modell-Mix-Verluste zusammengefasst werden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Verringerung dieser Verluste ist die Gestaltung der Struktur des Produktionssystems. Prinzipiell findet bei der Strukturplanung eine Kapazitätsteilung<sup>9</sup> des Produktionssystems in Teilkapazitäten statt. Durch eine Gegenüberstellung des Kapazitätsbedarfes des Produktionsprogramms mit dem Kapazitätsangebot der Produktiveinheiten kann über die Teilungsform des Produktionssystems entschieden werden. Übertragen auf die Strukturplanung von Fließmontagesystemen bedeutet dies, geeignete Montagestrukturen zu finden, indem eine Trennung des Montagesystems in Vor- und Endmontagebereiche sowie in parallele Produktionslinien vorgenommen wird.<sup>10</sup> Die unterschiedlichen Teilungsformen eines mehrstufigen Fließproduktionssystems sind schematisch in Abbildung 1.1 dargestellt.

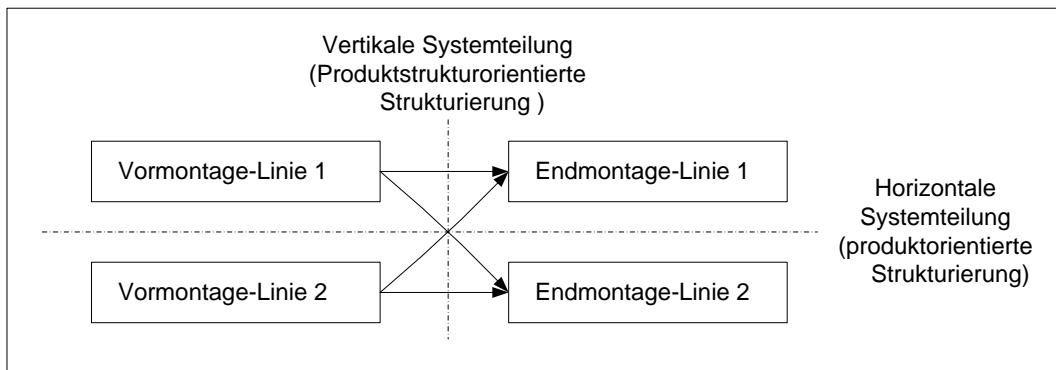


Abbildung 1.1: Teilungsformen eines mehrstufigen Fließproduktionssystems

Die Bedeutung der Strukturplanung ergibt sich aus der weitgehenden Festlegung der Kostenstruktur in diesem Planungsschritt. Daher ist es notwendig, auch unsichere Stückzahlprognosen in der Planung zu berücksichtigen und die kapazitiven Anpassungen des Produktionssystems während der Nutzungsphase zu antizipieren.

Schwerpunkt dieser Arbeit ist daher die Untersuchung und Entwicklung von Methoden, die bei der Strukturplanung von getakteten Fließproduktionssystemen eingesetzt werden können. Dabei sollen insbesondere drei Fragestellungen untersucht werden:

- Wie kann die Kapazitätsteilung eines Produktionssystems mit getakteten Fließproduktionslinien bei geschlossenen Stationsgrenzen<sup>11</sup> kostenoptimal gestaltet werden?

<sup>9</sup> Vgl. Bullinger (1986), S. 126ff.

<sup>10</sup> Vgl. Eversheim (1989) S. 167ff.

<sup>11</sup> Zur Beschreibung der Prinzipien von offenen und geschlossenen Stationsgrenzen siehe Kapitel 2.1.2.

- 
- Wie kann die Kapazitätsteilung eines Produktionssystems mit getakteten Fließproduktionslinien bei offenen Stationsgrenzen kostenoptimal gestaltet und genutzt werden?
  - Wie kann bei verteilten Produktionssystemen mit getakteten Fließproduktionslinien eine möglichst optimale Anpassungsstrategie bei schwankenden und unsicheren Nachfragezahlen realisiert werden?

Aus diesen Fragestellungen leitet sich der Aufbau der Arbeit ab. Zunächst wird in Kapitel 2 eine genauere Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes und des zu lösenden Problems vorgenommen sowie die Freiheitsgrade und Restriktionen der einzelnen Planungsaufgaben dargestellt. Aufgrund der prinzipiell unterschiedlichen Möglichkeiten im Umgang mit der Variantenvielfalt in Fließproduktionssystemen wird hierbei zwischen Systemen mit offenen und geschlossenen Stationsgrenzen unterschieden, für die im Folgenden jeweils getrennte Lösungsansätze vorgestellt werden. Ein weiterer Abschnitt ist der Anpassungsplanung von verteilten Fließproduktionssystemstrukturen bei Unsicherheit der Nachfrage gewidmet.

Der Stand der Technik zur Strukturplanung in der Montage wird in Kapitel 3 dargestellt. Darauf aufbauend erfolgt eine Untersuchung der Anwendbarkeit der vorgestellten Methoden auf die zu lösenden Fragestellungen.

In Kapitel 4 werden die in dieser Arbeit zu leistenden Entwicklungstätigkeiten abgeleitet, um die eingangs gestellten Fragen zu beantworten.

Die Methoden, die zur Lösung der beschriebenen Aufgaben benötigt werden, werden in Kapitel 5 entwickelt. Die Bearbeitung erfolgt getrennt für die Einzelfragestellungen bei offenen und geschlossenen Stationsgrenzen sowie für die Anpassungsplanung.

In Kapitel 6 wird ein allgemeines Planungsvorgehen entwickelt, das als Prozessmodell für die Planung von Fließproduktionsliniensystemen dienen kann. Die in dieser Arbeit entwickelten Methoden werden hierzu in ein geeignetes Prozessmodell eingeordnet.

Um die entwickelten Methoden zu validieren und deren Potenziale aufzuzeigen, werden die Planungsalgorithmen in Kapitel 7 auf entsprechende Beispielprobleme angewendet.

Kapitel 8 enthält abschließend eine Zusammenfassung der geleisteten Tätigkeiten sowie eine kritische Betrachtung der vorgestellten Methoden und Vorgehensweisen.

## 2 Problembeschreibung

Im Folgenden soll eine genauere Beschreibung des in dieser Arbeit untersuchten Problems vorgenommen werden. Dazu wird in einem ersten Schritt auf das Organisationsprinzip der Fließproduktion in der Montage eingegangen. Anschließend werden die Aufgaben bei der Strukturplanung dieser Fließproduktionslinien genauer beschrieben. Die Darstellung erfolgt dabei getrennt nach den drei in der Einleitung genannten Fragestellungen.

### 2.1 Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes

Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit sind getaktete Fließproduktionslinien in der Montage. Im Folgenden sollen die für die Strukturplanung relevanten Eigenschaften sowie die zu betrachtenden Kostenarten beschrieben werden.

#### 2.1.1 Eigenschaften von Fließproduktionslinien in der Montage

Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit ist die Fließproduktion in der Montage. Daher soll zunächst das zugrunde liegende Funktions- und Organisationsprinzip beschrieben werden.

Nach VDI Richtlinie 2815 werden in der Montage zu Baugruppen oder Erzeugnissen aus Einzelteilen zusammengebaut. Als eines der Hauptfertigungsverfahren nach DIN 8580 bei der Montage ist das Fügen zu sehen. Darüber hinaus schließt Montieren jedoch auch die Nebenfunktionen Handhaben, Justieren, Kontrollieren sowie Hilfsfunktionen ein.<sup>12</sup> Das Montagesystem stellt damit ein Subsystem des Produktionssystems dar und beinhaltet alle Ressourcen, die zur Ausführung der Montageprozesse notwendig sind.

Innerhalb der Montage stellen die Personalkosten üblicherweise den größten Anteil an den Produktionskosten dar, so dass hier das größte Kostensenkungspotenzial in der Arbeitseffizienz zu suchen ist. Dennoch liegen verschiedene Gründe vor, die einer vollständigen Automatisierung der Montage entgegenstehen.<sup>13</sup>

- Kürzere Produktlebenszyklen und steigende Variantenzahlen
- Hoher Anpassungsbedarf an wechselnde Marktanforderungen, da die Montage den letzten Produktionsschritt darstellt
- In Planung und Entwicklung aufgetretenen Fehler wirken sich in der Montage aus
- Verschiedenartigkeit der Montagevorgänge erfordern eine hohe Flexibilität, die nur durch hohen Personaleinsatz erreicht werden kann
- Produktspezifische Montagetechniken und Organisationsformen erschweren eine Übertragbarkeit auf andere Produkte

---

<sup>12</sup> Vgl. u.a. Lotter (1986), S. 1.

---

- Mangelhafte montagegerechte Produktgestaltung

Damit wird klar, dass sich die Montageplanung in der variantenreichen Serienproduktion trotz zunehmenden Einsatzes von Automatisierungseinrichtungen auch in Zukunft überwiegend mit der Planung manueller Tätigkeiten beschäftigen wird.<sup>14</sup> Um unter diesen Bedingungen eine wettbewerbsfähige Produktion erreichen zu können, gilt es also, bei der Gestaltung der Montagesysteme ein besonderes Augenmerk auf die Arbeitseffizienz zu legen.

Gestaltungsobjekte für die Planung in der Montage sind neben dem Produkt an sich, den Montage- und Fügetechnologien, den Betriebsmitteln, der Informationsbewirtschaftung und den Mitarbeitern auch die Organisation der Arbeitskräfte und des Arbeitssystems.<sup>15</sup> Da sich die in dieser Arbeit untersuchte Aufgabe der Strukturplanung vorrangig mit der Organisation befasst, soll im Folgenden etwas genauer auf die Gestaltungsmöglichkeiten in diesem Bereich eingegangen werden.

Die Besonderheit in der Montageplanung liegt darin, dass grundsätzlich von einer Beweglichkeit der beteiligten Elementarfaktoren Arbeitskraft, Betriebsmittel und Montageobjekt ausgegangen werden kann. Montageobjekte können beim Montageprozess entweder fest, d.h. statio-när an den Montageort gebunden sein, oder instationär und somit frei beweglich sein.<sup>16</sup> Ausgehend von diesem Ansatz lassen sich damit verschiedene Organisationsprinzipien für die Montage ableiten, wobei generell eine Aufteilung in das Verrichtungs- und das Fließprinzip möglich ist.<sup>17</sup>

Beim Fließprinzip erfolgt die Anordnung der Arbeitselemente entsprechend der Reihenfolge der Arbeitsgänge des Werkstückes. Eine Differenzierung des Fließprinzips ist anhand der zeitlichen Kopplung der Arbeitsgänge möglich. Eine Reihenproduktion liegt vor, wenn keine zeitliche Kopplung zwischen den Bearbeitungsstationen besteht und die Werkstücke erst nach vollständiger Beendigung der Arbeitsgänge bzw. bei Bedarf weitergegeben werden. Bei einer Reihenproduktion ist daher die Einrichtung von Puffern zwischen den Arbeitsstationen notwendig. Durch eine zeitliche Kopplung werden die Arbeitsvorgänge dagegen direkt miteinander verbun-den. Dies kann entweder verfahrensbedingt wie bspw. in der Prozessindustrie sein oder dispositiv durch eine erzwungene Weitergabe des Werkstückes nach einem festem Zeitabschnitt (Takt) erreicht werden.<sup>18</sup> Dieser Organisationstyp wird auch als Fließproduktion bezeichnet.

Eine Übersicht über die Einordnung der Fließproduktion in die Produktionsprinzipien bietet Abbildung 2.1. Eine weitere Systematisierung der Organisationsformen innerhalb der Fließmontage findet sich bei *Petersen*, der eine Unterscheidung bezüglich der Kinematik der Elementarfaktoren vornimmt.<sup>19</sup> So kann zum einen ein Montageobjekt instationär sein, während die Arbeitskräfte und Betriebsmittel an die Bearbeitungsstationen gebunden sind, zum anderen können

---

<sup>13</sup> Vgl. Abele et al. (1985).

<sup>14</sup> Vgl. Willnecker (2001), S. 8f.

<sup>15</sup> Vgl. Gottschalk (2006), S. 11f.

<sup>16</sup> Vgl. Petersen (2005), S. 52ff.

<sup>17</sup> Vgl. Krycha (1996), S. 1620f.

<sup>18</sup> Vgl. Boysen (2005), S6f.

<sup>19</sup> Vgl. Petersen (2005), S. 120ff.

aber auch die Montageobjekte an die Stationen gebunden sein, während die Arbeitskräfte und Betriebsmittel nach Abschluss eines Arbeitsgangs den Ort wechseln. Eine dritte Organisationsform ergibt sich, wenn von einer Beweglichkeit aller Elementarfaktoren ausgegangen wird und sich somit Betriebsmittel und Arbeitskräfte innerhalb einer begrenzten Teilstrecke neben dem bewegten Montageobjekt fortbewegen.

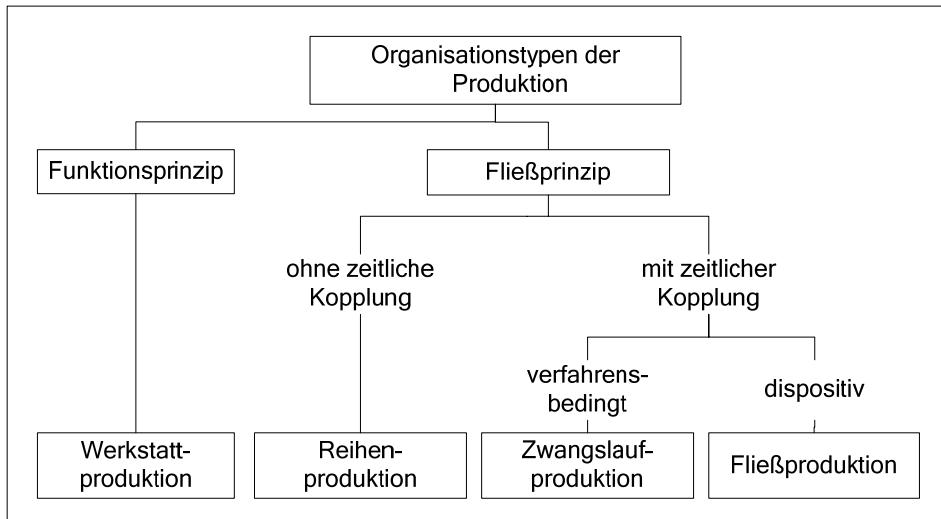


Abbildung 2.1: Organisationstypen der Produktion<sup>20</sup>

Fließproduktionssysteme können in Einprodukt- und Mehrproduktproduktionslinien unterschieden werden. Im Mehrproduktfall kann dabei weiter unterschieden werden nach:

- Losweiser Montage, bei der zwischen den einzelnen Produktvarianten umgerüstet wird (Multi-Model-Linie).
- Gemischter Montage, bei der die Umrüstvorgänge vernachlässigt werden können und Varianten in beliebiger Reihenfolge gebaut werden (Mixed-Model-Linie).<sup>21</sup>

Fließproduktionssysteme finden aufgrund ihrer Vorteile vor allem in der Großserien- und Massenfertigung ihre Anwendung.<sup>22</sup> Insbesondere die Vorteile niedriger Transportkosten, hoher Auslastung der Anlagen und Flächen, geringer Durchlaufzeiten und ein geringer Koordinationsaufwand sprechen für die Anwendung eines Fließproduktionssystems.<sup>23</sup> Insbesondere für die Montage ergibt sich eine Reihe von Bedingungen, die für die Einrichtung einer Fließproduktion gegeben sein sollten:<sup>24</sup>

- Zerlegbarkeit des Montageprozesses
- Möglichkeit der räumlichen Konzentration der Arbeitsvorgänge

<sup>20</sup> Boysen (2005), S. 7.

<sup>21</sup> In diesem Fall kann auch von „Losgröße 1“ gesprochen werden. Zum Begriff „Mixed Model Assembly Line“ vgl. Thomopoulos (1967). Andere gebräuchliche Begriffe sind „Variantenfließfertigung“ (vgl. u. a. Boysen (2005b).) und „Modell-Mix-Montagelinie“ (vgl. u. a. Leopold (1997) und Koether (1986)).

<sup>22</sup> Vgl. Schulte (1999).

<sup>23</sup> Vgl. Kratzsch (2000), S. 10.

- 
- Konstante Ausführungszeiten der Montagevorgänge
  - Ausgereifter Entwicklungsstand der Produkte
  - Hohe Stückzahl
  - Produktionszeitraum rechtfertigt Planungs- und Investitionsaufwand
  - Transportierbarkeit der Werkstücke

Als Beispiele für Fließproduktionssysteme in der Montage können hier die Fahrzeugmontage oder die Motorenmontage in der Automobilproduktion angeführt werden, in denen hohe Stückzahlen in einem konstanten Takt auf Produktionslinien mit der Losgröße 1 montiert werden. Die Montageobjekte laufen dabei meist mit einer kontinuierlichen Bewegung durch die Montagestationen, wo sie von den Mitarbeitern bearbeitet werden. Der Takt ergibt sich aufgrund der festgelegten Stationsgröße durch die Bewegungsgeschwindigkeiten der Montageobjektträger. Diese können entweder fest auf ein Transportband montiert sein oder in Form von fahrerlosen Transportsystemen frei beweglich und über ein Steuerungssystem synchronisiert sein. Im Fall der kontinuierlich bewegten Montageobjekte spielt die Art der Stationsgrenze eine wichtige Rolle beim Umgang mit schwankenden Bearbeitungszeiten<sup>25</sup>:

- Geschlossene Stationsgrenzen: Bei geschlossenen Stationsgrenzen hat die Bearbeitung innerhalb der Stationsgrenzen zu erfolgen. Das bedeutet, dass die Summe der durchzuführenden Bearbeitungszeiten die vorgegebene Taktzeit innerhalb einer Station nicht überschreiten darf. Da in diesem Fall der Werker immer innerhalb seiner Stationsgrenzen bleibt, können die Montageobjekte in beliebiger Reihenfolge auf die Montagelinie aufgelegt werden.
- Offene Stationsgrenzen: Der Werker kann sich mit dem bewegten Montageobjekt über die Stationsgrenze bewegen und weiter Tätigkeiten ausführen, die über die Taktzeit hinausgehen (Stationsgrenze offen zur nachfolgenden Station). Ebenso kann es möglich sein, dass der Werker seine Arbeit an dem Montageobjekt schon vor Erreichen seiner Station beginnt (Stationsgrenze offen zur vorhergehenden Station). Die offene Stationsgrenze wirkt somit als Puffer gegen Schwankungen der Bearbeitungszeit. Da sich hier der Werker in Abhängigkeit von den auftretenden Belastungen im Zeitverlauf aus seiner Station herausbewegen kann, muss durch eine gezielte Reihenfolgebildung und den Einsatz von Unterstützungsarbeitskräften sichergestellt werden, dass festgelegte Grenzen dieser Abdriftbewegung nicht überschritten werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften von Fließproduktionslinien mit offenen und geschlossenen Stationsgrenzen muss im Folgenden bei der Beschreibung der durch die Strukturplanung beeinflussbaren Kosten und der daraus abzuleitenden Planungsziele ebenfalls eine Unterscheidung vorgenommen werden.

---

<sup>24</sup> Vgl. Kratzsch (2000), S. 8ff.

<sup>25</sup> Vgl. Thomopoulos (1967).

## 2.1.2 Arbeitskosten in variantenreichen Fließproduktionslinien

Bei der getakteten Fließproduktion sind die Arbeitsvorgänge fest den einzelnen Arbeitsstationen der Produktionslinie zugeordnet. Dies ist notwendig, um den Arbeitskräften einen bestimmten Arbeitsumfang zuzuordnen, für den diese qualifiziert und für den aufgrund der Wiederholrate Lernkurveneffekte erwartet werden können. Auch für die Andienung des zu verbauenden Materials an die Station ist eine feste Zuordnung notwendig, um standardisierte Logistikprozesse zu ermöglichen sowie Mehrfachstandorte vermeiden zu können. Diese Zuordnung ist Ergebnis der Austaktung, die eine möglichst optimale Verteilung der Arbeitsvorgänge zum Ziel hat. Je nach Form und Ausgestaltung der Linie können die Zielsetzung und die zu beachtenden Restriktionen dabei unterschiedlich formuliert werden.<sup>26</sup> Auf theoretischer Seite existiert eine Vielzahl von mathematischen Lösungsansätzen, die von gegebenen Vorrangbeziehungen zwischen den Arbeitsvorgängen und deren Einzelzeiten ausgehend eine Minimierung der Arbeitskosten anstreben. Diese Verfahren stehen jedoch in Gegensatz zu der oftmals in Praxis gegebenen Situation, in der die notwendigen Vorrangbeziehungen oftmals nur als implizites Wissen der Planer vorliegen und nur selten formalisiert werden. Auch die Tatsache, dass die Berücksichtigung der Varianten in den mathematischen Modellen nur in Form von Prozess-Häufigkeiten stattfindet, führt dazu, dass die tatsächlich auftretende Belastung der Station bei einem konkreten Auftrag unzureichend abgebildet wird.<sup>27</sup> Daher ist die Arbeitszuordnung in der Praxis meist das Produkt eines manuellen Prozesses.

Die Arbeitszuordnung wird beim Aufbau der Produktionslinie festgelegt und dann in regelmäßigen Zeitintervallen überarbeitet, um auf geänderte Ausstattungsquoten und Bearbeitungszeiten in Folge von Verbesserungsmaßnahmen zu reagieren.

### 2.1.2.1 Bestimmung von Arbeitskosten bei geschlossenen Stationsgrenzen

Unabhängig vom gewählten Verfahren zur Austaktung sowie der zeitlichen Stabilität der Arbeitszuordnung kann davon ausgegangen werden, dass keine 100-prozentige Auslastung der Arbeitsstationen möglich ist. Dies liegt daran, dass die einzelnen Arbeitsvorgänge nicht beliebig teilbar sind. Dadurch kann die Taktzeit nicht immer vollständig ausgenutzt werden.

Darüber hinaus kommt es im Mehr-Produkt-Fall dazu, dass die unterschiedlichen Montageprozesse der einzelnen Varianten wechselnde Bearbeitungszeiten an der Station verursachen. Hier wird die Variante mit der jeweils maximalen Bearbeitungszeit an der Station zur Taktzeit bestimmenden Variante (siehe Abbildung 2.2). Die Differenz zwischen Taktzeit und Bearbeitungszeit wird als Taktverlust bezeichnet, die Differenz zwischen niedrigster und höchster Bearbeitungszeit an einer Station als Zeitspreizung.

---

<sup>26</sup> Eine Literaturübersicht zu Austaktungsverfahren findet sich bei Boysen et al. (2006).

<sup>27</sup> Vgl. Falkenauer (2005).

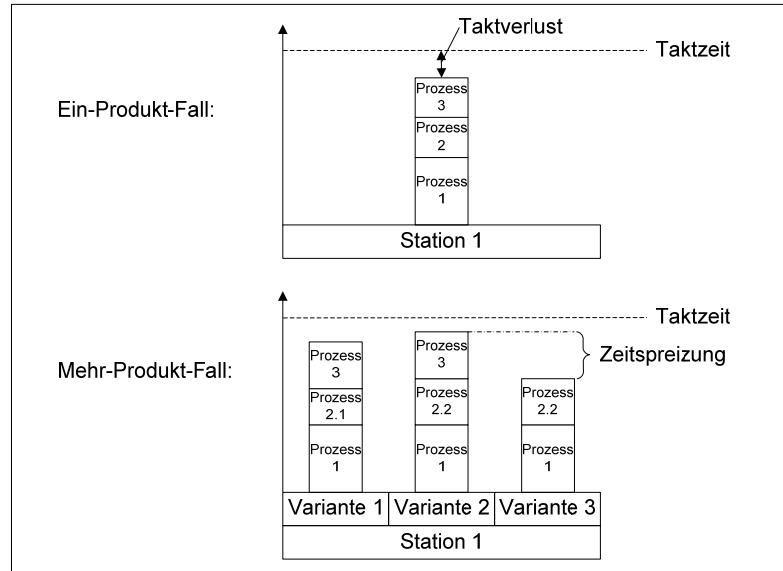


Abbildung 2.2: Taktverluste im Ein- und Mehr-Produktfall

Allgemein kann der Taktverlust für den Mehr-Produkt-Fall wie folgt berechnet werden:

$$TV_{Linie} = \sum_{j \in J} \left( n_{gesamt} \cdot c^T - \sum_{v \in V} t_{v,j} \cdot n_v \right)$$

wobei

$TV_{Linie}$  Gesamttaktverlust der Fließproduktionslinie

$j \in J$  Menge der Stationen

$v \in V$  Menge der Varianten

$n_{gesamt}$  Gesamtanzahl der produzierten Produkte

$n_v$  Anzahl der Produkte von Variante  $v$  mit  $n_{gesamt} = \sum_{v \in V} n_v$

$c^T$  Taktzeit der Linie

$t_{v,j}$  Bearbeitungszeit der Variante  $v$  an Station  $j$

Da Werker und Betriebsmittel während des gesamten Taktes zur Verfügung stehen und dementsprechend auch Kosten verursachen, bedeutet eine Verringerung der Taktverluste eine Erhöhung der Produktivität. Zu beachten ist jedoch, dass sich eine Kostensenkung erst dann ergibt, wenn eine vollständige Station bzw. Arbeitskraft infolge einer verbesserten Arbeitszuordnung eingespart werden kann.

#### 2.1.2.2 Bestimmung von Arbeitskosten bei offenen Stationsgrenzen

Ein wichtiger Ansatz zur Verbesserung der Stationsauslastungen und somit zur Minimierung des Taktverlustes ist das Öffnen der Stationsgrenzen. Hierdurch können die Werker mit dem Montageobjekt über das Ende der Stationsgrenze hinaus gleiten, wenn die benötigte Arbeitszeit

die Taktzeit überschreitet. Dieser Vorgang wird auch als Driften bezeichnet. Diese Zeitüberschreitung muss jedoch bei den nachfolgenden Aufträgen wieder eingeholt werden, da sich der Werker ansonsten immer weiter von seinem Ausgangsort entfernen würde. Abbildung 2.3 stellt diesen Zusammenhang dar. Zu erkennen ist, dass ein Abdriften des Werkers sich über mehrere Takte aufsummieren kann, so dass der Werker sich immer weiter über das Stationsende hinausbewegt. Ein Abbau dieses Abdrifts findet nur bei Montageobjekten mit einer Bearbeitungszeit unter der Taktzeit oder bei Einsatz von Unterstützungsarbeitskräften statt. Ein weiterer Effekt ist das Eindringen des Werkers in die Folgestation, wodurch der Werker an dieser Station unter Umständen mit seinem Arbeitsbeginn warten muss.

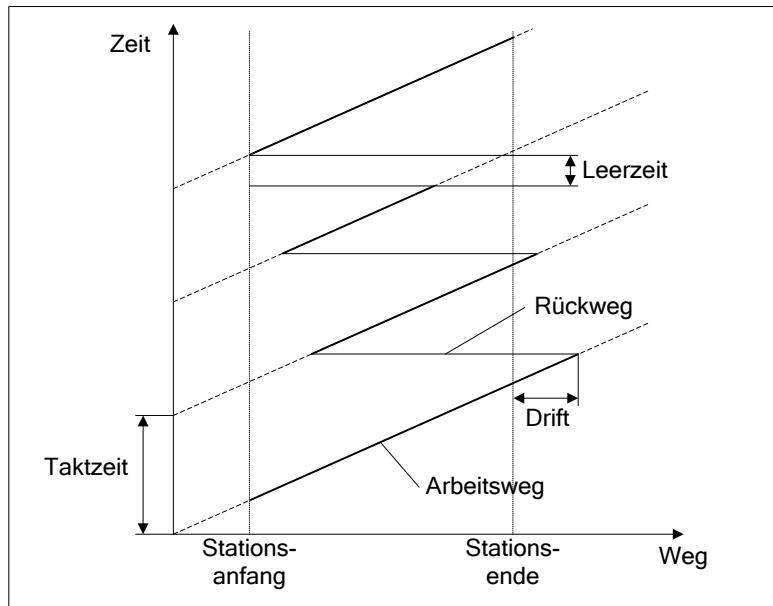


Abbildung 2.3: Werkerposition im Zeitverlauf bei offenen Stationsgrenzen

Notwendige Bedingung für das Zulassen von Driftvorgängen ist, dass die mittlere Bearbeitungszeit an einer Station nicht den Takt überschreitet, da die Station ansonsten überlastet ist und immer Unterstützungsleistung hinzugezogen werden muss:

$$\frac{\sum_{v \in V} t_{v,j} \cdot n_v}{n_{\text{gesamt}} \cdot c^T} \leq 1 \quad \text{für alle } j \in J$$

Im Fall offener Stationsgrenzen ist es notwendig, die Montageaufträge so zu sequenzieren, dass das Abdriften des Werkers ein bestimmtes Maß nicht überschreitet. Zusätzlich zum Abdriftverhalten der Werker ergeben sich weitere Einschränkungen für die Reihenfolgebildung aus technischer Sicht.<sup>28</sup> Insbesondere bei enger Koppelung an den Markt und evtl. auftretenden Häufungen ungünstiger Produkteigenschaften stellt die Bildung einer kostenoptimalen Sequenz eine komplexe Aufgabe dar. Daher existiert eine Vielzahl von Verfahren, die sich mit der Bildung

<sup>28</sup> So kann es sein, dass z.B. bestimmte Füllanlagen oder Einbauhilfen so ausgelegt wurden, dass sie nur jedes zweite oder dritte Produkt bedienen können.

der Auflegereihenfolgen beschäftigen.<sup>29</sup> Ziel dieser Verfahren ist es meist, möglichst eine Gleichverteilung der Belastungsspitzen zu erreichen und damit ein Aufwachsen der Abdriftbewegung zu vermeiden. Daneben existieren auch andere Zielsetzungen wie Minimierung der Leerzeit oder der Springereinsätze.

Gelingt es nicht, das Abdriften der Werker durch Sequenzbildung zu kontrollieren, wird der Einsatz von sog. Spaltenbrechern oder Springern notwendig, die eingesetzt werden, wenn der Werker die Grenze für seine Abdriftbewegung überschreiten würde. Der Springer übernimmt dann einen Teil der Montageumfänge, so dass die Driftgrenzen eingehalten werden können. Um die Arbeitskosten bei Linien mit offenen Stationsgrenzen vollständig abzubilden, müssen diese Springereinsätze ebenfalls berücksichtigt werden. Bei der Berechnung der Kosten ist zu beachten, dass Springer immer gesamte Schichtlängen anwesend sind und nicht nur für ihre tatsächlichen Einsatzzeiten entlohnt werden müssen.

Tritt eine Überlastung eines Werkers auf und steht gleichzeitig kein Springer zur Verfügung, so kann auch ein bestimmter Montageumfang ausgelassen werden, wenn dieser nicht für die Durchführung nachfolgender Prozesse notwendig ist. Dieser ist dann durch Nacharbeit am Ende der Linie nachzuholen und verursacht Kosten in Höhe der dort anfallenden Arbeitskosten.

Eine weitere Möglichkeit ist es, die gesamte Linie im Fall einer Überlastung oder eines Qualitätsproblems anzuhalten, wenn die angeforderte Unterstützungsleistung nicht zur Behebung des Problems innerhalb der vorgegebenen Zeit ausreicht. Im Fall eines solchen Notstopps treten Kosten für die Wartezeiten aller an der Linie arbeitenden Werker während des Stillstandes auf.

Komplexer ist die Bewertung von Qualitätskosten in Folge von reihenfolgebedingten Überlastungen. Diese können zu nicht sachgemäß durchgeführten Bearbeitungen durch den Werker und damit zu qualitätsrelevanten Fehlern führen, die entdeckt und auch durch Nacharbeit beseitigt werden müssen. Damit sind auch die Kosten zur Qualitätskontrolle und Fehlerbehebung zum Teil dem Aufbau von Belastungsspitzen zuzurechnen.

Während die Arbeitskosten bei Fließproduktionslinien mit geschlossenen Stationsgrenzen aus der Anzahl der Stationen berechnet werden konnten, ist dies bei offenen Stationsgrenzen nicht direkt möglich, da hier weitere Kosten für den Einsatz von Springern und Nacharbeitsarbeitskräften entstehen. Diese sind jedoch durch eine Simulation des Fertigungsablaufes unter Berücksichtigung der Reihenfolge möglich. Anhand der Werkerpositionen lassen sich die Springereinsätze ableiten und damit die direkten Arbeitskosten am Fließband ermitteln.<sup>30</sup>

### 2.1.3 Investitionskosten in variantenreichen Fließproduktionslinien

Neben den entstehenden Arbeitskosten sind die Investitionskosten für die Betriebsmittel bei der Planung von Fließproduktionssystemen zu berücksichtigen. Daher sollen die relevanten technischen Einrichtungen identifiziert werden, die von den Entscheidungen der Strukturplanung ab-

---

<sup>29</sup> Vgl. dazu u. a. Boysen (2005a).

<sup>30</sup> Für Ansätze zur simulationsbasierten Bewertung von Arbeitskosten vgl. u.a. Koether (1986) und Leopold (1997).

hängig und somit als Bestandteile einer Zielfunktion zur Bewertung der Gesamtkosten für ein Montagesystem heranzuziehen sind.

Im Folgenden sollen die technischen Einrichtungen in Montagesystemen kurz aufgeführt werden. Diese können prinzipiell in Betriebsmittel für Montageoperationen, Materialfluss und Pufferung eingeteilt werden.<sup>31</sup>

Zur Durchführung der Montageoperationen müssen die einzelnen Stationen mit Betriebsmitteln ausgestattet werden. Die Auswahl der Betriebsmittel ist abhängig von dem durchzuführenden Montagevorgang und dem gewünschten Automatisierungsgrad. Die Montageplatzausstattungen können unterteilt werden in Universal-Betriebsmittel, Sonderbetriebsmittel und Teilebereitstellungseinrichtungen.<sup>32</sup> Eine weitere mögliche Unterscheidungsart ist die Einteilung in Montagemittel, die direkt eine technische Arbeit an dem Montageobjekt durchführen, und Montagehilfsmittel, die nicht direkt dem Arbeitsfortschritt dienen (z.B. Hebehilfen und Vorrichtungen).

Zu den technischen Einrichtungen für den Materialfluss gehören Verkettungs- und Fördermittel. Diese dienen der Verbindung der einzelnen Montagestationen und sind die Grundlage bei der Einrichtung einer Montagelinie. Beispiele für Verkettungseinrichtungen in getakteten Fließproduktionslinien sind Gurtbandförderer, Rollenbahnen, Kettenförderer, Hängebahnen oder fahrerlose Transportsysteme. Oftmals können die Montageobjekte nicht direkt auf dem Fördermittel transportiert werden. In diesem Fall ist die Verwendung von Werkstückträgern notwendig, die zur Aufnahme der Montageobjekte dienen.

Puffer werden in Montagesystemen zwischen Arbeitsstationen eingerichtet, um benachbarte Stationen taktmäßig voneinander zu entkoppeln. Sie sollten daher in den hier betrachteten verketteten Montagelinien möglichst vermieden werden, um die Vorteile des gleichmäßigen Materialflusses und der geringen Lagerbestände beizubehalten. Dennoch kann ihr Einsatz zwischen einzelnen Liniensegmenten notwendig sein, um Störungen oder sehr große Arbeitszeitunterschiede auszugleichen. Ein weiterer Grund für die Einrichtung von wahlfreien Puffern ist die Möglichkeit zur Resequenzierung bei offenen Stationsgrenzen.

Bei der Planung von Montagesystemen sind die Kosten für die Anschaffung der Betriebsmittel gemeinsam mit den Arbeitskosten bei der Bewertung der Gesamtkosten zu berücksichtigen. Wie bei der Bestimmung der Arbeitskosten können auch die Investitionskosten erst dann bestimmt werden, wenn die den einzelnen Linien zugeordneten Produktionsmengen und Varianten bekannt sind. Werden Varianten gleichzeitig auf mehreren parallelen Linien gebaut, müssen auch auf allen Linien die dafür notwendigen Montagemittel installiert werden.

In Mehrliniensystemen ist darüber hinaus die Materialflusstechnik zu berücksichtigen, die für den Transport der Montageobjekte zwischen den Linien notwendig ist. Ebenso kann der Aufbau von Puffern zwischen den Linien notwendig werden, um Störungen einzelner Produktionsabschnitte abzufangen.

---

<sup>31</sup> Vgl. Bullinger (1986), S 149ff.

<sup>32</sup> Vgl. Bullinger (1986), S 249ff.

## 2.2 Aufgaben der Strukturplanung von getakteten Fließproduktionssystemen

Im Folgenden sollen die Aufgaben der Strukturplanung dargestellt werden, um diese in den sich anschließenden Abschnitten auf die spezifischen Eigenschaften getakteter Fließproduktionssysteme zu übertragen.

Grundsätzlich werden im Rahmen der Strukturplanung Entscheidungen über die Ausgestaltung der Produktionsanlagen getroffen, die die Voraussetzung für die wirtschaftliche Produktion bilden. Der Planungshorizont der Strukturplanung entspricht dabei üblicherweise dem Lebenszyklus der zu planenden Anlagen und kann somit auch mehrere Produktlebenszyklen umfassen. Daher sollte bei der Strukturplanung bereits die Entwicklung und Anpassung des Produktionsystems über diesen gesamten Zeitraum mit berücksichtigt werden.

Allgemein bezeichnet der Begriff Struktur die innere Gliederung eines Systems, mit der die Beziehungen zwischen den Systemelementen und die Elemente selbst nach Art und Anzahl beschrieben werden.<sup>33</sup> Unter Strukturierung wird allgemein das Einteilen einer Menge von Elementen in Teilmengen verstanden, in denen sich die Elemente jeweils bezüglich der Einteilungskriterien ähneln.<sup>34</sup> Da die Teilmengen auch als Klassen bezeichnet werden, wird dieser Vorgang auch als Klassifizierung bezeichnet. Der Prozess des Strukturierens basiert dabei auf den Verfahren des Zerlegens und des Zusammenfügens.<sup>35</sup> Im Rahmen der Zerlegung erfolgt eine Aufgliederung der Gesamtaufgabe in Teilelemente (Aufgabenanalyse). Die Produktionsaufgabe wird durch einen mehrstufigen Analyseprozess in einzelne Teilaufgaben zerlegt, wobei eine ausreichende Zerlegung dann erreicht wurde, wenn eine Zuordnung auf die Aufgabenträger möglich ist.<sup>36</sup> Durch das Zusammenfügen erfolgt das Gruppieren der Teilaufgaben zu arbeitsteiligen Einheiten, durch deren Beziehungen zueinander die Aufbaustruktur des Unternehmens beschrieben wird (Aufgabensynthese).

Grundsätzliche Aufgabe der Strukturplanung ist es, basierend auf den Vorgaben der Zielplanung und der Betriebsanalyse, alternative Strukturkonzepte für eine Fabrik zu entwickeln, das bevorzugte Konzept auszuwählen und in einen Strukturplan umzusetzen. Dieser wird dann im Rahmen einer anschließenden Ausführungs- und Realisierungsphase ausgearbeitet und umgesetzt.<sup>37</sup> Der Detaillierungsgrad nimmt dabei immer weiter zu, während die Freiheitsgrade der Planung immer weiter eingeschränkt werden. Im Rahmen der Planung von Strukturkonzepten kann auch zwischen Ideal- und Realplanung unterschieden werden.<sup>38</sup> Dabei wird zunächst ein idealisiertes Konzept mit allen räumlichen und organisatorischen Strukturen erstellt, das in einem zweiten Schritt durch die Konkretisierung der Logistikelemente auf die realen Gegebenheiten angepasst wird.

<sup>33</sup> Vgl. REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (1985), S. 89.

<sup>34</sup> Vgl. Sodeur (1974), S. 9.

<sup>35</sup> Vgl. Gälweiler (1986), S. 76ff.

<sup>36</sup> Vgl. Kosiol (1976), S. 48.

<sup>37</sup> Vgl. Eversheim; Schuh (1999), S. 9-58f. und Abbildung 2.4.

<sup>38</sup> Vgl. Grundig (2006), S. 30ff.

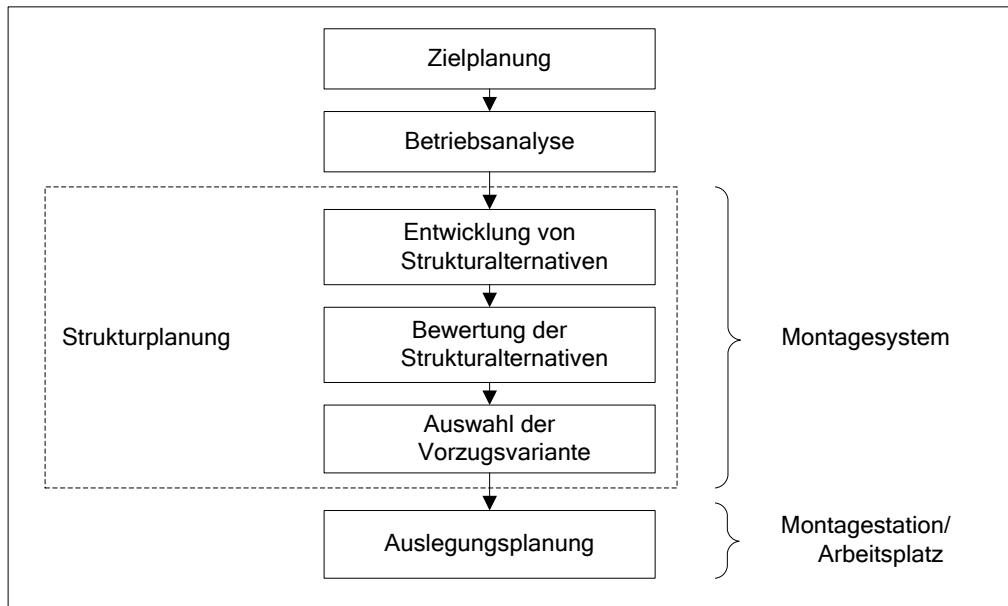


Abbildung 2.4: Einordnung der der Strukturplanung in den Planungsablauf<sup>39</sup>

Die Vorgehensweise, mehrere Strukturkonzepte zu erstellen und zu untersuchen, ist notwendig, da nicht immer eine Lösung gefunden werden kann, die alle Zielstellungen erfüllt. Anschließend muss daher eine Auswahl des zu realisierenden Konzeptes durch ein geeignetes Bewertungsverfahren stattfinden. Die Strukturplanung stellt nicht nur die kreativste Planungsphase innerhalb der Produktionsplanung dar, sondern nimmt aufgrund ihrer Wichtigkeit für alle nachfolgenden Phasen auch eine besondere Rolle ein.

Aufgrund des engen Zusammenhangs der während der Strukturplanung durchzuführenden Aufgaben und der Notwendigkeit einer teilweise parallelen Bearbeitung bietet sich eine Darstellung in Form eines Netzwerkes an (siehe Abbildung 2.5). Die Aufgaben der Strukturierung stehen dabei in engem Zusammenhang zueinander und müssen in Form eines iterativen Prozesses auf den verschiedenen Detaillierungsebenen des Planungsprozesses durchgeführt werden.<sup>40</sup>

Die Bildung von Struktureinheiten erfolgt anhand einer Analyse und Aufbereitung des Produktionsprogramms, aus dem die notwendigen Produktionsprozesse und Ausrüstungen abzuleiten sind. Die Bildung der Einheiten kann unterschiedlichen übergeordneten Prinzipien folgen.<sup>41</sup> So kann anhand einer Produktorientierung eine Aufteilung des Produktionssystems nach Produkten bzw. Varianten erfolgen. Als ein weiterer Ansatz kann die Fertigungsform dienen, durch die eine Einteilung des Produktionsprogramms anhand der Stückzahlen in Renner und Exoten erfolgt, die dann auf unterschiedlichen Montageeinheiten hergestellt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Strukturierung entsteht auch durch die Gliederung des Montagesystems anhand der Produktstruktur in unterschiedliche Produktionsstufen. Dabei folgt die Strukturierung in der

<sup>39</sup> In Anlehnung an Eversheim; Schuh (1999), S. 9-59.

<sup>40</sup> Vgl. Eversheim; Schuh (1999), S. 9-61f.

<sup>41</sup> Vgl. Eversheim (1989), S. 30ff.

Praxis oftmals einer Kombination der einzelnen Prinzipien, um die jeweiligen Vorteile nutzen zu können.<sup>42</sup>

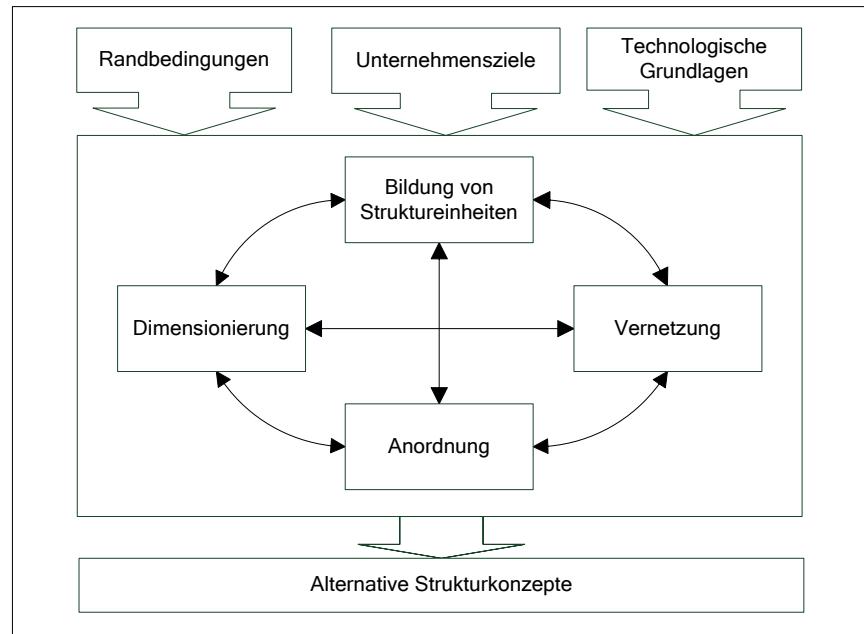


Abbildung 2.5: Aufgaben der Strukturplanung<sup>43</sup>

Innerhalb der Strukturplanung ist auch die Aufgabe der Dimensionierung zu lösen. Bei der Dimensionierung geht es im Wesentlichen um die Bestimmung der Größen für Betriebsmittel, Personal und Flächen.<sup>44</sup> Die Dimensionierung erfolgt anhand einer Gegenüberstellung des Kapazitätsbedarfes der durchzuführenden Aufgaben mit dem Kapazitätsangebot der bereitzustellenden Kapazitätseinheiten.

Bei der Vernetzung der Struktureinheiten werden die logistischen Verbindungen zwischen den Einheiten geplant. Da der Transportaufwand im Wesentlichen von der räumlichen Entfernung abhängt, können Anordnung und Vernetzung nicht unabhängig voneinander betrachtet werden und sind daher in direktem Zusammenhang zu planen.<sup>45</sup>

Während der Anordnungsplanung werden die dimensionierten Einheiten im Rahmen der Layoutplanung an Standorten auf der Produktionsfläche platziert. Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren und Bewertungskriterien ergibt sich eine Vielzahl von einzeln zu untersuchenden Alternativen. Dennoch kann hier in Einzelfällen eine algorithmische Unterstützung angewendet werden.<sup>46</sup>

Aufgrund der starken Interdependenzen der Teilaufgaben der Strukturplanung ergibt sich eine hohe Komplexität bei der Bewältigung der Gesamtaufgabe. Voraussetzung für eine Unterstützung bei der Entwicklung und Bewertung von Grobstrukturkonzepten und damit der Beherr-

<sup>42</sup> Vgl. Eversheim (1989), S. 30.

<sup>43</sup> Vgl. Vollmer; Bertagnolli, S. 7 (1994).

<sup>44</sup> Vgl. Eversheim; Schuh (1999), S. 9-78.

<sup>45</sup> Vgl. Grundig (2006), S. 103.

<sup>46</sup> Vgl. Dangelmaier (2001) S. 42-43.

schung dieser Komplexität ist also ein ausreichender Abstraktionsgrad der Einflussfaktoren und Restriktionen.

Bei komplexen Montagesystemen ist zu beobachten, dass diese einem hierarchischen Aufbau folgen (siehe Abbildung 2.6).<sup>47</sup> Die Elemente einer Ebene lassen sich jeweils wiederum in Elemente einer tieferen Betrachtungsebene aufgliedern. Der gesamte Montagebereich eines Unternehmens lässt sich so meist in einzelne Montageteilbereiche aufteilen, in denen die verschiedenen Produktsparten hergestellt werden. Innerhalb dieser Teilbereiche kann die Montage eines Produktes in Abhängigkeit von der Stückzahl auf mehreren Einzelsystemen stattfinden, die sich wiederum in Teilsysteme wie Vor- und Endmontagen gliedern. Als kleinste zu strukturierende Einheit kann die Montagestation bzw. der Montagearbeitsplatz gesehen werden. Die organisatorische Aufteilung der Montage kann allgemein als Strukturierung<sup>48</sup> oder bezogen auf die Aufteilung des Gesamtsystems auf Teilsysteme als Systemteilung<sup>49</sup> bezeichnet werden.

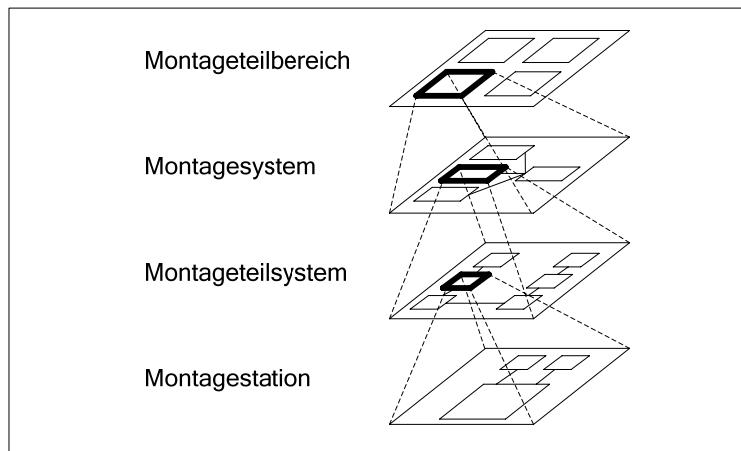


Abbildung 2.6: Hierarchischer Aufbau der Montage

Erfordert die Stückzahl eines Produktes den Aufbau mehrerer Produktionssysteme, ist eine Kapazitätsteilung vorzunehmen. Der Gesamtkapazitätsbedarf ergibt sich dabei aus der Multiplikation der herzustellenden Menge mit der für die Montage jedes Produktes benötigten Zeit, der Gesamtstückzeit. *Dittmayer* verwendet zur Darstellung der Kapazitätsteilung das Kapazitätsfeld, in dem die Produktionsstückzahl über der Montagedauer je Produkt aufgetragen ist (siehe Abbildung 2.7).<sup>50</sup> Bei der Teilung des Kapazitätsfeldes unterscheidet er zwischen Mengen- und Artteilung. Bei der Artteilung wird der Kapazitätsbedarf auf mehrere Arbeitsplatzkapazitäten so verteilt, dass jeweils nur ein Teil der Gesamtarbeitszeit, dafür aber an der gesamten Menge durchgeführt wird. Bei der Mengenteilung wird der Kapazitätsbedarf auf mehrere Arbeitsplatzkapazitäten so verteilt, dass an jedem Arbeitsplatz die Gesamtstückzeit durchgeführt wird, dafür aber nur an einer Teilmenge.

<sup>47</sup> Vgl. Merz (1987), S. 29f.

<sup>48</sup> Vgl. Lotter; Wiendahl (2006), S. 101.

<sup>49</sup> Vgl. Bullinger (1993), S. 11.

<sup>50</sup> Vgl. Dittmayer (1981).

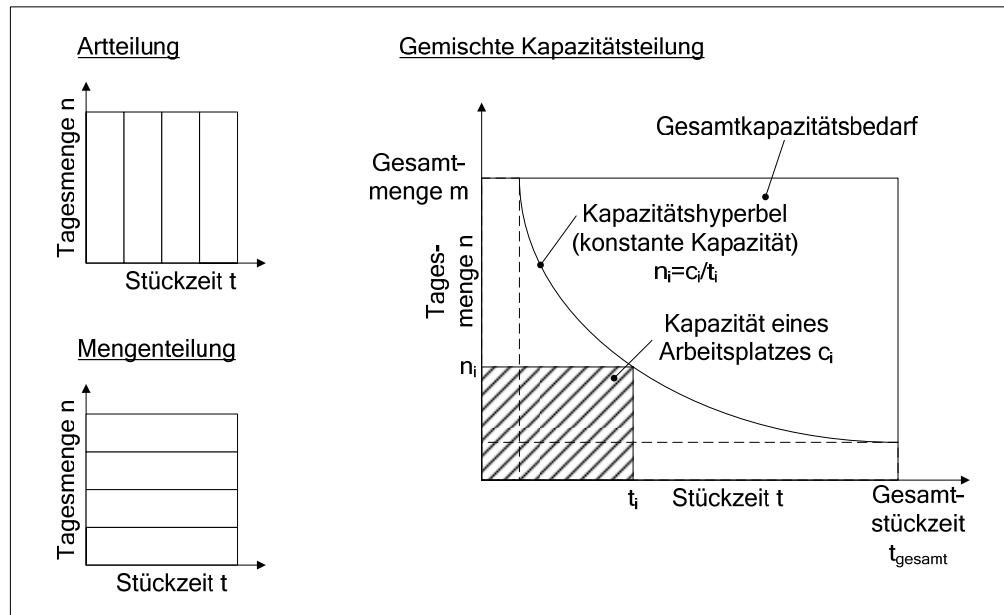


Abbildung 2.7: Kapazitätsfeld und Kapazitätsteilung<sup>51</sup>

Bei der Kapazitätsteilung ist zu entscheiden, welche Varianten auf welchem System baubar sein sollen. Abbildung 2.8 zeigt die unterschiedlichen Fälle, die bei der Teilung eines Montagesystems entstehen können. Werden mehrere Montagesysteme zur Produktion einer Variante benötigt, liegt eine Mengenteilung vor. Bei der Arteilung kann unterschieden werden zwischen Teilungen anhand des Produktspektrums und der Produktstruktur. Bei der Arteilung bezüglich des Produktspektrums werden auf den Einzelsystemen variantenbedingt unterschiedliche Tätigkeiten durchgeführt, bei einer Arteilung bezüglich der Produktstruktur werden auf den Systemen zwar unterschiedliche, aber sich ergänzende Umfänge durchgeführt. Als typisches Beispiel kann hier eine Aufteilung in Vor- und Endmontagebereich genannt werden.

*Bullinger* nennt zwei unterschiedliche Prinzipitypen bei der Teilung des Kapazitätsfeldes: Das Rennersystem, das mit hoher Stückzahl und starker Arbeitsteilung arbeitet und das Exotensystem, das geringe Stückzahlen mit einer geringen Arbeitsteilung herstellt.<sup>52</sup> *Gottschalk* erweitert diese Definition und verwendet den Begriff der Arteilung für die kapazitive Trennung unterschiedlicher Produktarten bzw. Varianten.<sup>53</sup> *Gottschalk* führt ebenfalls den Begriff der Kapazitätsstrukturierung ein, um deutlich zu machen, dass eine Aufteilung der Gesamtkapazität in Teilkapazitäten stattfindet.<sup>54</sup> Durch Gegenüberstellung von Kapazitätsbedarf und Kapazitätsangebot der Systemelemente kann im Rahmen der Teilung über alternative Strukturen entschieden werden.

<sup>51</sup> Vgl. Dittmayer (1981), S. 55.

<sup>52</sup> Vgl. Bullinger (1995), S. 105ff.

<sup>53</sup> Vgl. Merz (1987), S. 33.

<sup>54</sup> Vgl. Gottschalk (2006), S. 32.

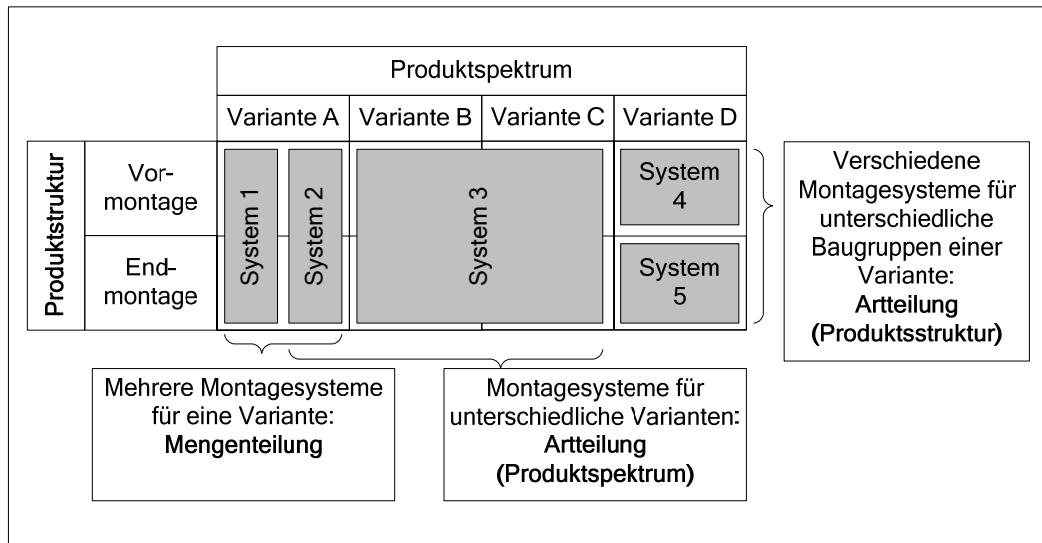


Abbildung 2.8: Aufteilung des Montageumfangs auf mehrere Montagesysteme<sup>55</sup>

### 2.2.1 Strukturplanung bei geschlossenen Stationsgrenzen

Die oben dargestellten Aufgaben der Strukturplanung von Montagesystemen lassen sich für die Planung von Fließproduktionslinien konkretisieren. Ziel ist es hier, Teilungsformen des Montagelinienystems zu finden, die zu einem Gesamtkostenoptimum führen. Die zur Bestimmung der Systemteilung entscheidungsrelevanten Kostenarten der Arbeitskosten und Investitionskosten konnten im ersten Abschnitt dieses Kapitels hergeleitet werden. Sie sind direktes Resultat der in der Strukturplanung durchgeführten Aufgaben der Bildung von Struktureinheiten und ihrer Dimensionierung.

Bei Anwendung des Prinzips der Kapazitätsteilung auf Fließproduktionssysteme ergeben sich zwei mögliche Teilungsformen:

- Teilung in parallele Linien (produktorientierte Gliederung)

Durch eine Teilung des Fließproduktionssystems in parallele Systemeinheiten entstehen parallele Fließproduktionslinien, denen die Varianten entsprechend der Prinzipien der Mengenteilung oder der Arteilung nach dem Produktspektrum zugeordnet werden. Wenn das Ergebnis der Teilung Produktionslinien sind, auf denen Produkte der gleichen Produktionsstufe hergestellt werden, kann diese Teilungsform auch als horizontale Teilung bezeichnet werden.

<sup>55</sup> In Anlehnung an Merz (1987), S. 33.

- Teilung in unterschiedliche Produktionsstufen (produktstrukturorientierte Gliederung)

Ein weiterer Ansatz zur Strukturierung von Fließproduktionssystemen ist die Teilung anhand des Produktionsfortschrittes. Dies entspricht einer Artteilung nach der Produktstruktur. Da diese Teilungsform Systemelemente verschiedener Produktionsstufen zur Folge hat, kann diese auch als vertikale Teilung bezeichnet werden.

Durch mehrfache Anwendung dieser Teilungsformen und Zusammenführungen können beliebige Liniensstrukturen für ein Montagesystem mit Fließproduktionslinien entstehen. Damit lassen sich die Entscheidungsparameter für die Strukturplanung von Fließproduktionslinien definieren (siehe auch Abbildung 2.9):

- Anzahl der vertikalen Teilungen im Liniensystem
- Position der vertikalen Teilungen
- Anzahl der horizontalen Teilungen in einer Produktionsstufe
- Zuordnung der Produktvarianten und Mengen auf die parallelen Montagelinien innerhalb einer Produktionsstufe

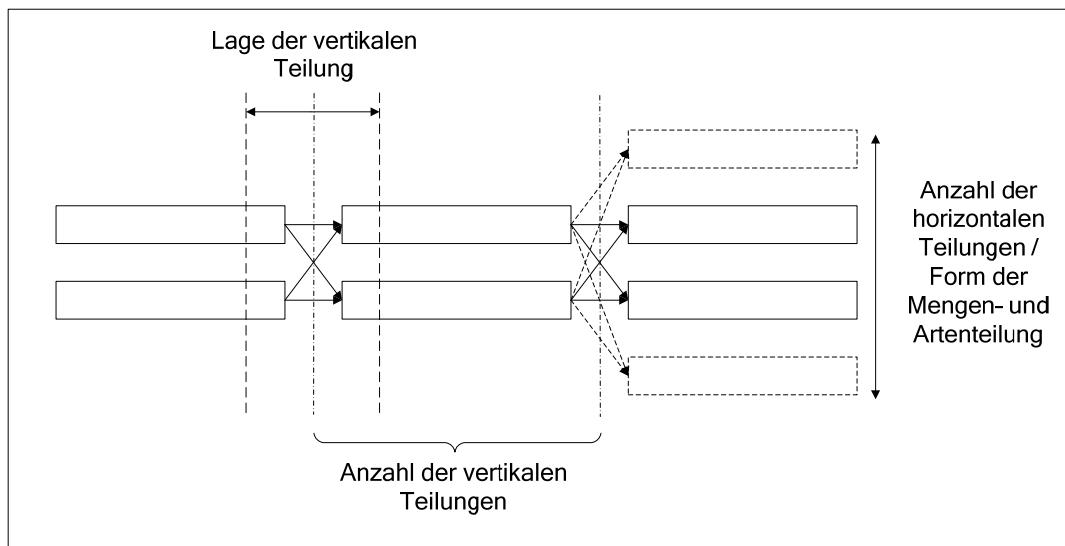


Abbildung 2.9: Parameter der Strukturplanung von Mehrliniensystemen

Eine horizontale Teilung des Fließproduktionssystems bei geschlossenen Stationsgrenzen kann sowohl aus Kapazitätsgründen (Mengenteilung) als aus Gründen der Produktähnlichkeit (Artteilung) erfolgen. Durch die Aufteilung des Produktionsprogramms auf parallele Linien nach dem Prinzip der Artteilung kann erreicht werden, dass die Bearbeitungszeitdifferenzen auf den einzelnen Linien im Vergleich zum Einliniensystem geringer ausfallen. Hierdurch kann bei geschlossenen Stationen eine verbesserte Austaktung und damit eine Senkung von Taktverlusten realisiert werden. Gleichzeitig müssen nach der Mengenteilung auch die Taktzeiten anhand der zugeordneten Produktionsmengen bestimmt werden. Aufgrund der Taktzeit kann eine Austaktung der Linie durchgeführt werden, aus der die Stationsanzahl der Linie zu bestimmen ist. Eine Kapazitätsteilung ist erst dann ein kostenmäßiger Vorteil, wenn durch die Mengen- und Artteilung

lung eine Verringerung der Summe von Arbeitsplätzen im Vergleich zum Ausgangszustand erreicht wurde.

Eine weitere Ursache für eine horizontale Teilung kann durch eine Mindesttaktzeit gegeben sein, die aus montagetechnischen Gründen nicht unterschritten werden darf. Dies kann eine Aufteilung der Produktionsmenge auf parallele Linien erforderlich machen. Ebenso kann der Aufbau paralleler Linien dann gerechtfertigt werden, wenn die Zuschläge für den dauerhaften Betrieb einer Linie in teureren Spät- und Wochenendschichten die Investitionskosten für eine zusätzliche parallele Linie übersteigen. Die Anzahl der parallel zu installierenden Linien richtet sich hier nach dem zu deckenden Kapazitätsbedarf. Lässt sich das Kapazitätsangebot nicht weiter wirtschaftlich durch die Ausweitung des Schichtmodells ausdehnen oder lassen sich bei einem Neubau die Taktzeiten aus technischen Gründen nicht weiter absenken, können die Fehlkapazitäten durch parallele Linien kompensiert werden. Die zusätzliche Installation von Montagelinien bewirkt dabei steigende Investitionskosten, die u.a. aus der redundanten Beschaffung von Ressourcen resultieren. Gleichzeitig ergeben sich aber durch eine immer weitere Parallelisierung Möglichkeiten zur Verringerung der Taktverluste und der varianzabhängigen Kosten. Zu beachten ist in jedem Fall, dass im Vergleich zu Einliniensystemen bei Mehrliniensystemen mit einem erhöhten Koordinations- und Steuerungsaufwand für die zusätzliche Materialflusstechnik zu rechnen ist.<sup>56</sup>

Die entscheidungsrelevanten Kosten bei der Entscheidung über die Kapazitätsteilung eines Fließproduktionssystems setzen sich damit aus den folgenden zwei Bestandteilen zusammen:

- Investitionskosten, die beim Aufbau des Montagesystems für Montagestationen, Betriebsmittel und Materialflusstechnik entstehen (siehe Abschnitt 2.1.2.1)
- Arbeitskosten, die während des Betriebes der Linien durch Arbeitskräfte an den Montagestationen verursacht werden (siehe Abschnitt 2.1.3)

Der prinzipielle Kostenverlauf bei veränderlicher horizontaler Teilung ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Das Diagramm ist so zu interpretieren, dass mit zunehmender Anzahl paralleler Montagelinien die Summe der Arbeitskosten im gesamten Montagesystem verringert werden kann. Zur Herleitung dieses Zusammenhangs soll angenommen werden, dass alle Arbeitsvorgänge beliebig fein teilbar sind. Werden die Arbeitsinhalte einer Variante gleichmäßig auf alle Stationen verteilt, ist es möglich, den Takt so abzusenken, dass keine Taktverluste mehr auftreten. Werden weitere Varianten mit abweichendem Arbeitsumfang auf dieselbe Linie gelegt, wird eine Variante zur Taktzeit bestimmenden Variante, bei allen anderen Varianten entstehen Taktverluste. Im äußersten Fall sind genau so viele Montagelinien aufzubauen, wie Produktvarianten existieren. Jede Montagelinie würde dann nur ein Produkt bauen, für das dann eine optimale Leistungsabstimmung erfolgen könnte.

Da die Taktverlustkosten bei geschlossenen Stationsgrenzen über die Taktausgleiche bewertet werden können, ergibt sich zusammen mit den Bearbeitungszeiten, die unabhängig vom Teilungsgrad sind, der in der Abbildung 2.10 dargestellte Kostenverlauf für die Arbeitskosten. In

Summe mit den Investitionskosten für die zu installierenden technischen Ressourcen kann die Gesamtkostenkurve berechnet werden, an deren Minimum die kostenoptimale Anzahl paralleler Linien liegt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass eventuell Restriktionen in Form der zur Verfügung stehenden Fertigungsfläche oder eines Minimaltaktes einzuhalten sind. Hierdurch kann sich eine Verschiebung der Lösung ergeben.

Anzumerken ist, dass dieser Zusammenhang idealisiert dargestellt ist und in der Realität davon ausgegangen werden muss, dass auch im Ein-Produkt-Fall Taktverluste auftreten. Daher sind die tatsächlich entstehenden Taktverluste immer für einen konkreten Fall zu berechnen.

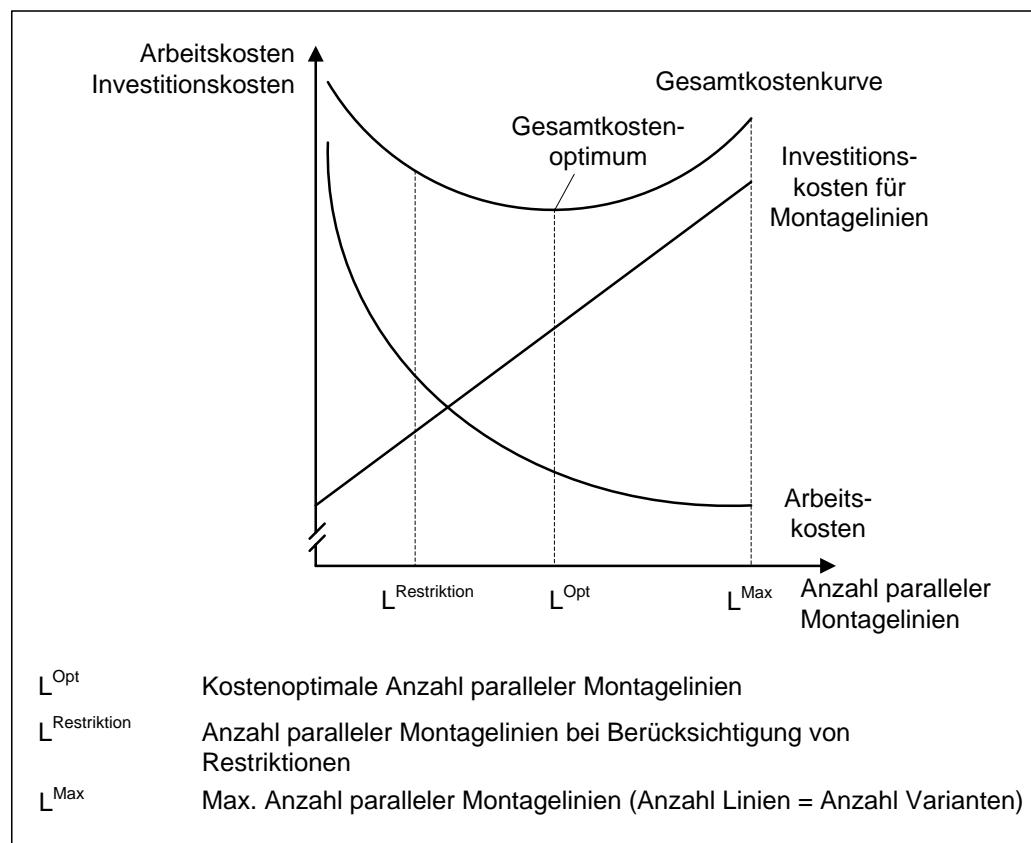


Abbildung 2.10: Kostenverläufe bei Aufbau von Parallellinien

Auch für die Einführung vertikaler Teilungen bestehen verschiedene Gründe. Die Teilung eines Montagesystems in mehrere Produktionsstufen erfolgt dann, wenn ein variantenreiches Endprodukt auf einem Rumpfprodukt aufgebaut werden kann. Im Idealfall lässt sich dann eine Trennung zwischen variantenneutralen Vormontagelinien mit geringer Zeitspreizung und spezialisierten Endmontagebereichen realisieren. Die Berechnung der Kosten für das Gesamtsystem erfolgt entsprechend den oben dargestellten Ansätzen.

Um die Vorgehensweise bei einer Kapazitätsteilung und die Auswirkungen auf die Personal- und Investitionskosten zu verdeutlichen, wird im Folgenden ein Beispiel herangezogen. In der Ausgangssituation mit nur einer Linie werden beide Produktvarianten auf einer Linie produziert, wobei die Zeitspreizung in den Stationen mit fortschreitendem Montageablauf zunimmt

<sup>56</sup> Vgl. Kratzsch (2000), S. 46.

(siehe Abbildung 2.11). Da geschlossene Stationsgrenzen vorliegen, können die Produkte in beliebigem Mischungsverhältnis und willkürlicher Reihenfolge produziert werden. Der Takt liegt bei sechs Zeiteinheiten und die Montageprozesse werden so zusammengefasst, dass je Station nur ein Arbeitsgang dargestellt wird. Als Ergebnis der Austaktung sind die Betriebsmittel R1 bis R12 den einzelnen Montagestationen zugeordnet. Hierbei unterscheidet sich der Ressourcenbedarf der beiden Produktvarianten an den ersten vier Stationen nicht, während auf den folgenden Stationen jeweils unterschiedliche Betriebsmittel benötigt werden.

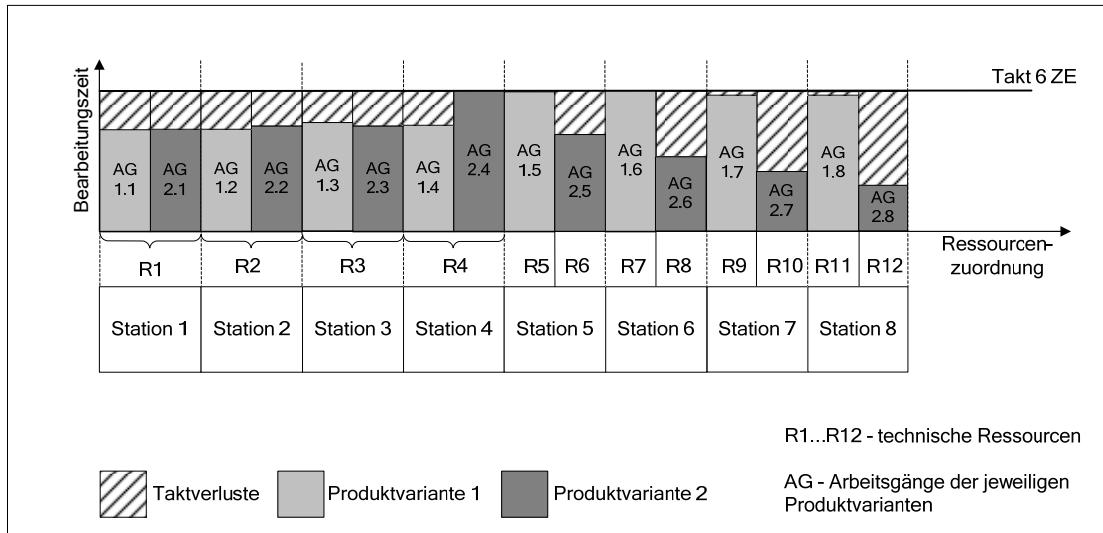


Abbildung 2.11: Beispiel für die Ausgangssituation einer Kapazitätsteilung

Unter der Annahme, dass die beiden Varianten in gleicher Stückzahl produziert werden, entstehen bei der Durchführung einer horizontalen Kapazitätsteilung entsprechend Abbildung 2.12 zwei parallele Montagelinien mit je halber Kapazität. Hierdurch verdoppelt sich die Taktzeit gegenüber dem Ein-Linien-Konzept, so dass Arbeitsvorgänge zusammengefasst werden können. In dem Beispiel reduziert sich so die Gesamtzahl an Montagestationen gegenüber der Ausgangssituation. Dem gegenüberzustellen sind jedoch die erhöhten Kosten für die hier mehrfach aufzubauenden Betriebsmittel an den jeweils ersten beiden Stationen sowie evtl. Mehrkosten für zusätzlich aufzubauende Auflege- und Abnahmeeinrichtungen, die je Linie installiert werden müssen.

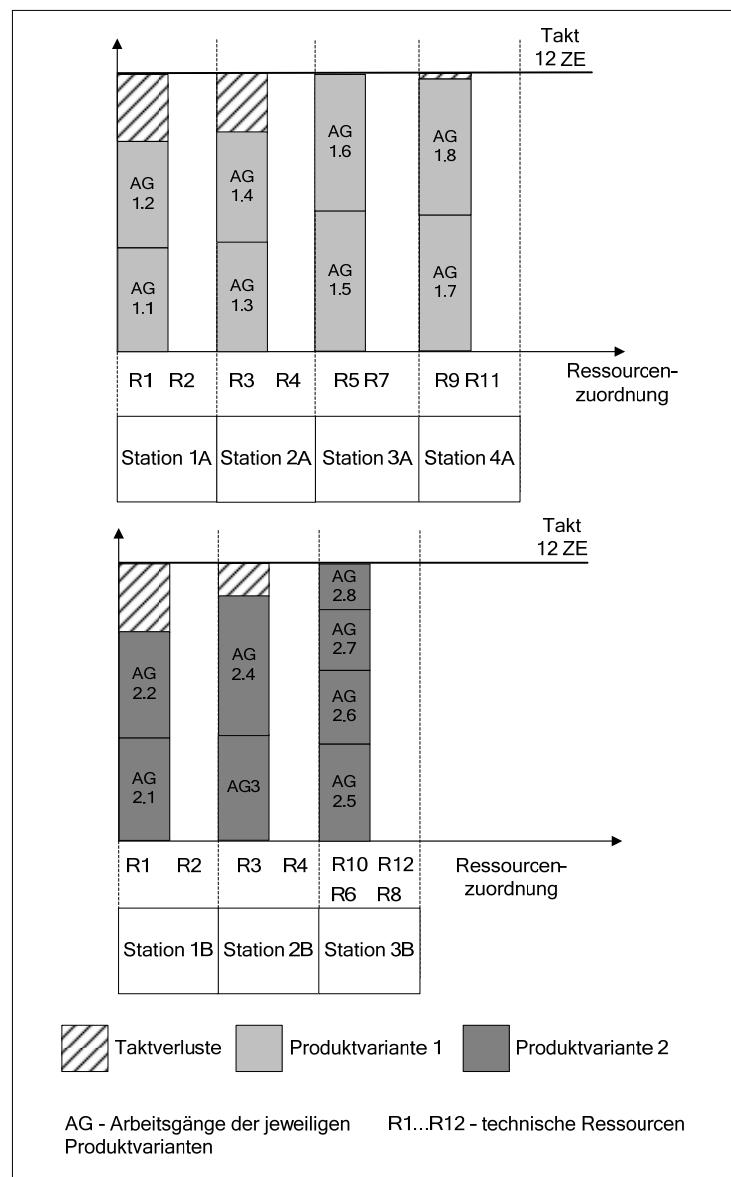


Abbildung 2.12: Beispiel für eine horizontale Kapazitätsteilung

Eine Möglichkeit, die Ähnlichkeit der Montageprozesse der unterschiedlichen Varianten in bestimmten Abschnitten nutzen zu können, ergibt sich durch die vertikale Teilung der Montagelinie. Durch die Zusammenlegung oder Trennung der Varianten auf den parallelen Linien kann in dem jeweiligen Abschnitt die kostengünstigste Teilungsform realisiert werden.

Zur Verdeutlichung der Aufgabe bei der Bestimmung einer vertikalen Teilung soll wieder das Beispiel aus dem vorangegangenen Abschnitt herangezogen werden. Durch eine Auftrennung der Linie ab dem zweiten Montageabschnitt ergibt sich hier eine vertikale Teilung in einen Vormontagebereich und einen Endmontagebereich. Der Endmontagebereich wird dann in Folge einer horizontalen Teilung in zwei parallele Linien wie im vorhergehenden Abschnitt getrennt. Die Ergebnisse der Teilung liegen zum einen in der besseren Auslastung im Vergleich zur Ausgangssituation und zum anderen in der gemeinsamen Ressourcennutzung im Vormontagebereich (siehe Abbildung 2.13).

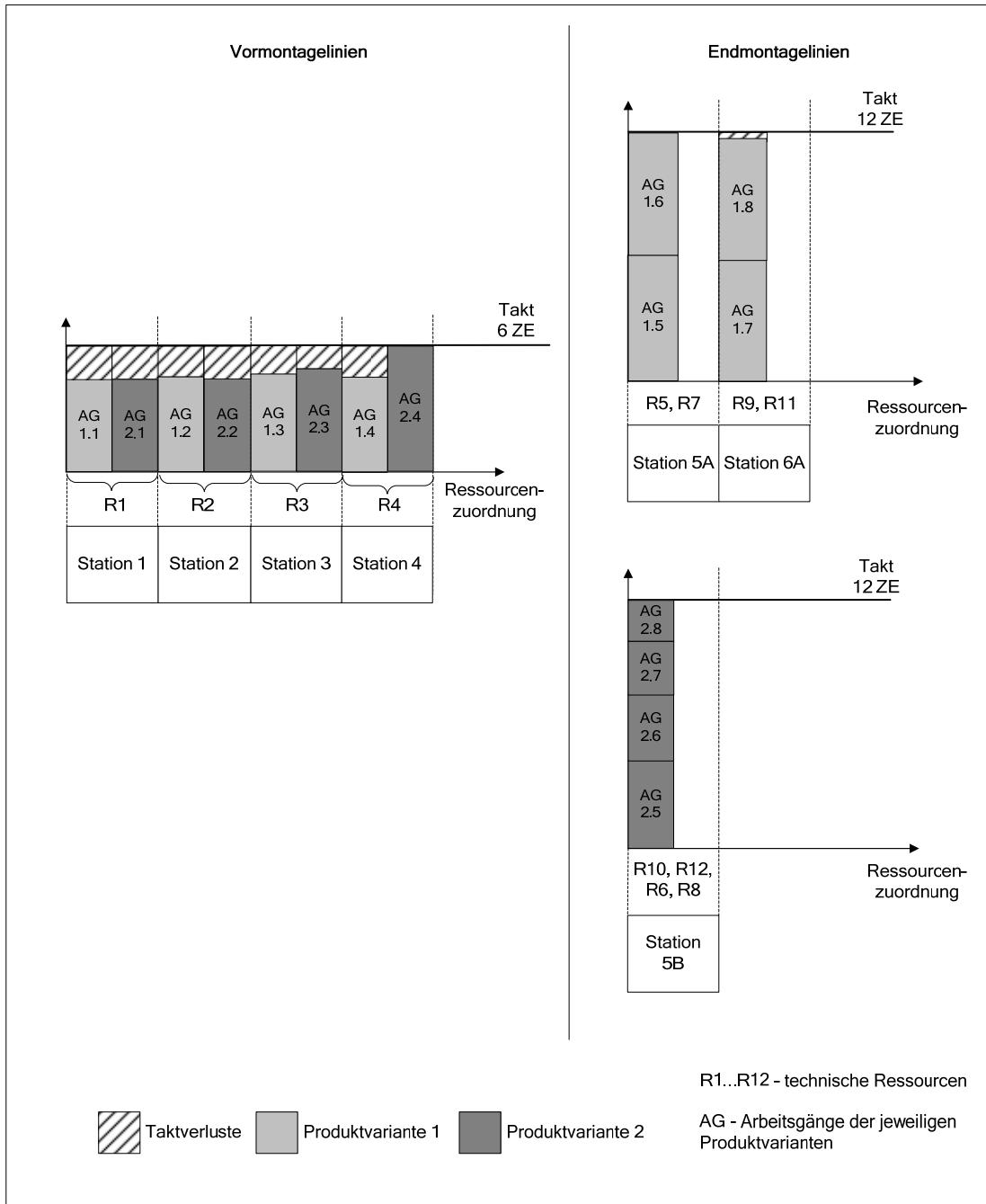


Abbildung 2.13: Beispiel für eine vertikale Kapazitätsteilung

Mit dem Ziel, eine weitere Kostenverbesserung zu erreichen, kann auch ein alternativer vertikaler Trennungspunkt untersucht werden. So ergibt sich bei Trennung des Liniensystems ab der zweiten Station die in Abbildung 2.14 dargestellte Situation. Aufgrund der doppelten Taktzeit in den Endmontagen können hier die Arbeitsgänge der vormaligen Stationen 3 und 4 zusammengelegt werden. Denkbar wäre eine Untersuchung der Absenkung des Taktes im Vormontagebereich zur Verringerung der Taktverluste, die aber nur durch eine gleichzeitige Entkopplung vom Endmontagebereich über einen Puffer sowie unterschiedliche Betriebszeiten der Linien realisierbar ist. Grundsätzlich treten bei dieser Lösung höhere Investitionskosten aufgrund der mehrfachen Installation der Ressourcen R3 und R4 auf.

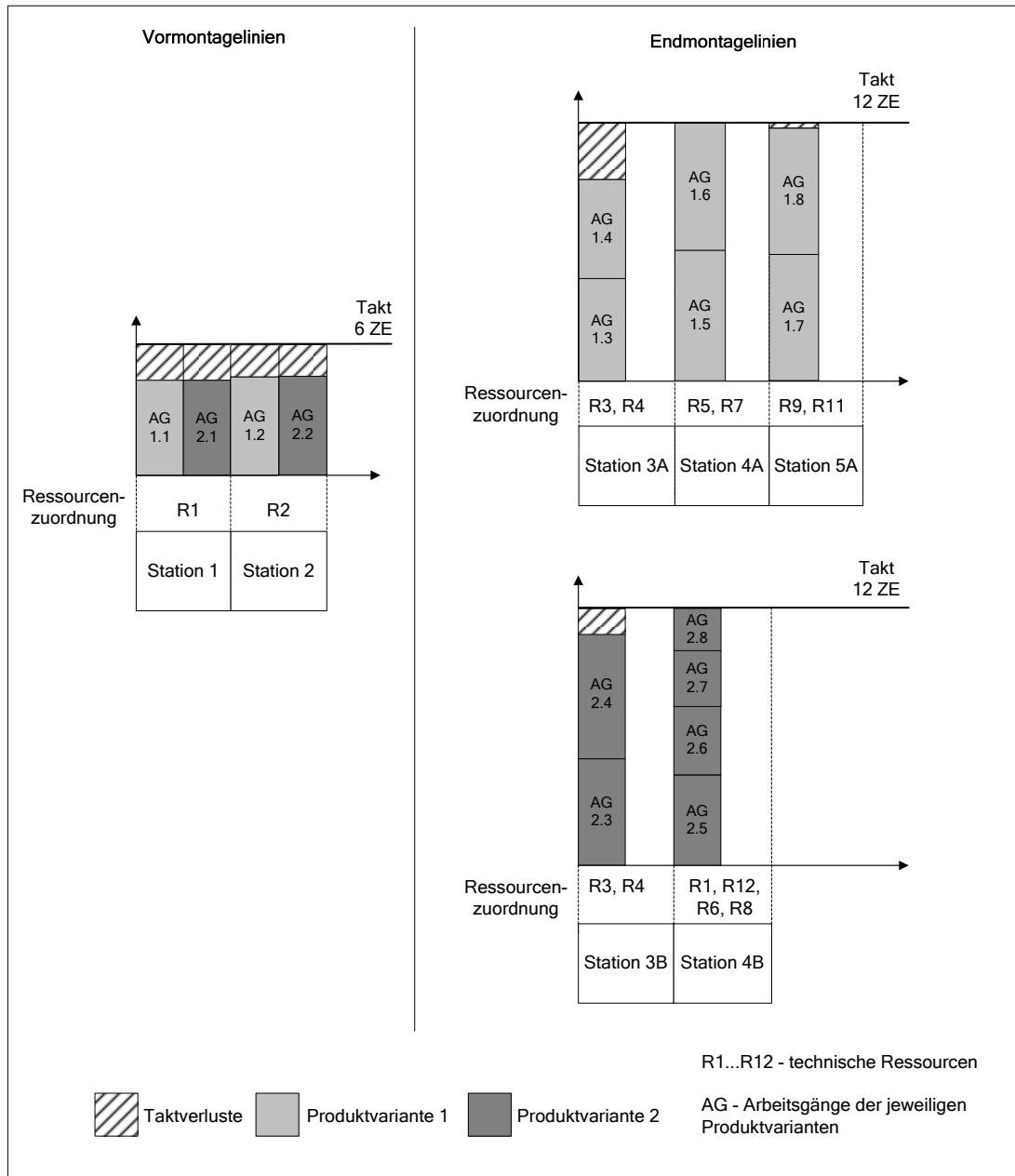


Abbildung 2.14: Beispiel für einen alternativen vertikalen Trennpunkt

Um eine kostenoptimale Teilung eines Fließproduktionssystems mit geschlossenen Stationsgrenzen bestimmen zu können, müssen horizontale und vertikale Teilung simultan untersucht werden, da die horizontale Teilung in den einzelnen Abschnitten von der vertikalen Teilung des Systems abhängt. Damit kann die Frage, die bei der Bestimmung der optimalen Systemteilung zu beantworten ist, wie folgt formuliert werden:

- An welcher Stelle des Montageablaufes soll eine vertikale Teilung des Produktionssystems erfolgen und wie ist die horizontale Teilung in den entstehenden Abschnitten nach Art und Menge des Produktionsprogramms auszugestalten?

## 2.2.2 Strukturplanung bei offenen Stationsgrenzen

Bei der Planung der Teilung von Fließproduktionslinien mit offenen Stationsgrenzen gestaltet sich die Berechnung der Kosten komplexer, da diese nicht mehr direkt über die Stationsanzahl berechnet werden können. Aufgrund der Möglichkeit des Driftens können hier Schwankungen der Bearbeitungszeit ausgeglichen werden und Wartezeiten verringert werden. Erst durch eine explizite Reihenfolgebildung und eine Simulation des Produktionsablaufes können die tatsächlich auftretenden Wartezeiten und Springereinsätze berechnet werden. Die Berechnung der Kosten für Unstetigkeiten in der Materialdienstleistung sowie für Qualitätsschwächen und Nacharbeit in Folge von Überlastungen sind auch auf diesem Wege nicht zu bestimmen und können nur abgeschätzt werden.

Dennoch können die Vorteile einer horizontalen Teilung genutzt werden, indem die Aufträge so auf die parallelen Linien zugeordnet werden, dass eine Minimierung der varianzinduzierten Kosten erreicht wird. Hieraus lassen sich Vorteile für die Reihenfolgebildung und somit für die Belastungskontinuität der einzelnen Montagestationen ableiten.<sup>57</sup> Die niedrigere Schwankung führt darüber hinaus zu einer gleichmäßigeren Materialversorgung und einer verbesserten Qualität aufgrund der höheren Bearbeitungskontinuität. Dieser Ansatz setzt jedoch voraus, dass eine solche Auftragszuordnung bereits bei der Stationsaustaktung berücksichtigt wird. Durch die geringere Streuung der Bearbeitungszeiten können die Stationen im Allgemeinen mit einem höheren durchschnittlichen Nutzungsgrad ausgetaktet werden. Dies ist dadurch möglich, dass die Wahrscheinlichkeit einer Überlastung und damit einer Springeranforderung geringer ist als bei einer hohen Streuung. Diese Planungsprämissen müssen bei Verfolgung einer solchen Zuordnungsstrategie anhand des zukünftigen Produktionsprogramms bestimmt werden.

Grundsätzlich kann die Schwankung über die Varianz der Bearbeitungszeiten bewertet werden. Diese ergibt sich wie folgt:

$$Var_{Station} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_{Station})^2$$

wobei

$N$  Anzahl der beobachteten Bearbeitungszeiten

$x_i$  Bearbeitungszeiten im Beobachtungszeitraum

$\mu_{Station}$  Erwartungswert der Bearbeitungszeiten mit  $\mu_{Station} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$

Somit ist das Ziel bei der Zuordnung eine möglichst geringe Schwankung der Produkteigenschaften auf den Einzellinien zu erhalten (siehe Abbildung 2.15). Das Maß zur Bewertung der Bearbeitungszeitschwankungen setzt sich dabei aus den Streuungsmaßen der einzelnen Stationen zusammen und lässt sich nur erfolgreich verringern, wenn sich homogene Auftragsgruppen bilden lassen.

---

<sup>57</sup> Vgl. Koether (1986), S. 83.

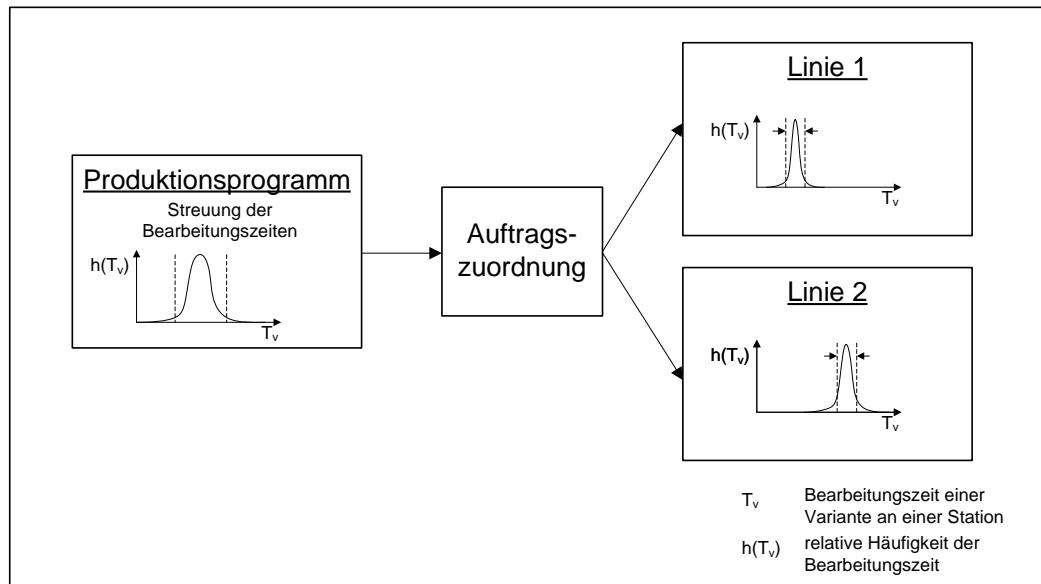


Abbildung 2.15: Zielsetzung der Varianzminimierung bei der Auftragszuordnung in Mehrliniensystemen mit offenen Stationsgrenzen

Auch wenn prinzipiell der Betrieb der parallelen Linien mit unterschiedlichen Taktzeiten denkbar ist, ist hier der Aufbau von Linien mit gleichen Taktzeiten und damit gleichen Bandlängen sinnvoll.<sup>58</sup> Dennoch ist es denkbar, die parallelen Linien nicht vollständig redundant auszulegen und bestimmte Aufträge nur auf bestimmten Linien produzieren zu können. Die Bestimmung der Baubarkeit eines Auftrages auf einer Linie kann über Auftragseigenschaften erfolgen, da sich aus diesen – direkt oder indirekt – die benötigten Ressourcen zur Fertigstellung ableiten lassen.

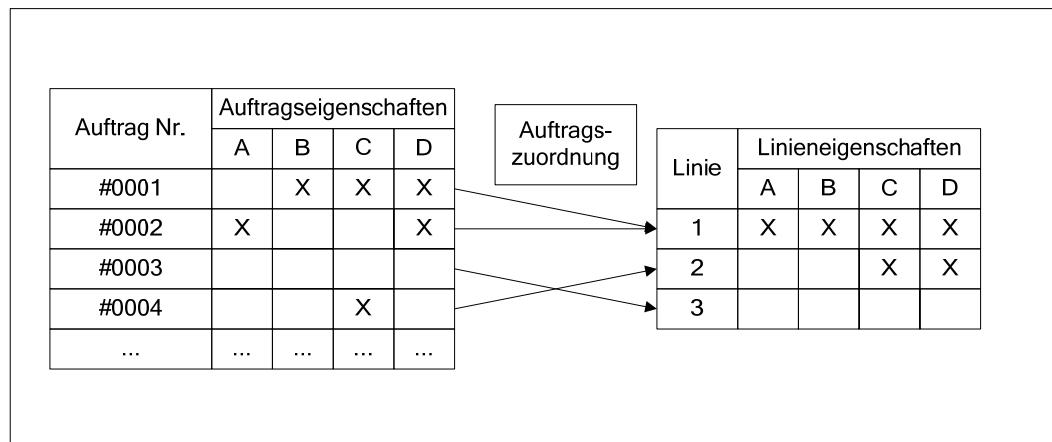


Abbildung 2.16: Auftragszuordnung bei beschränkter Baubarkeit der Aufträge

Bei der Planung der Fließproduktionslinien ist also zu berücksichtigen, welche Ressourcen auf welchen Linien zu installieren sind. So ist z.B. in der Automobilmontage denkbar, dass Cabrio-fahrzeuge nur auf einer Linie baubar sind. In diesem Fall muss sichergestellt werden, dass ein

<sup>58</sup> Zu der gleichen Einschätzung kommen auch Gottschalk (2006), S. 204f. und Kratzsch (2000) S. 119ff.

ausreichender Redundanzgrad bezüglich der Baubarkeit von Aufträgen vorliegt, um Fehlmen-  
gen zu vermeiden.

Somit stellen sich bei der horizontalen Teilung eines Fließmontagesystems mit offenen Stati-  
onsgrenzen zwei Fragen:

- Wie ist der Redundanzgrad bezüglich der Baubarkeit von Aufträgen der parallelen Fließmontagelinien auszustalten?
- Wie lässt sich das Produktionsprogramm so auf die parallelen Produktionslinien zutei-  
len, dass eine minimale Varianz der Bearbeitungszeiten erreicht wird?

Analog zu Fließproduktionssystemen mit geschlossenen Stationsgrenzen kann eine vertikale Teilung auch bei offenen Stationsgrenzen erfolgen. Trennungen sind bspw. denkbar, wenn im Anfangsbereich eine geringe Streuung der Montagezeiten auftritt und diese im weiteren Verlauf ansteigt. Ein entsprechendes Montagesystem würde so aussehen, dass im vorderen Bereich nur auf einer oder wenigen Linien produziert wird, während im hinteren Bereich eine horizontale Teilung stattfindet, in dem die Montage auf mehreren parallelen Linien stattfindet. Nimmt die Ähnlichkeit im weiteren Produktionsablauf wieder zu, kann es wiederum zu einer Zusammen-  
führung kommen.

Insbesondere bei der Umverteilung und Zusammenführung ergeben sich hohe Anforderungen an die Steuerungslogik, da die Vorteile der offenen Stationsgrenzen nur bei einer Reihenfolge-  
planung realisiert werden. Um die Qualität der Reihenfolge in einem entsprechenden Fall zu erreichen, wäre es notwendig, an den Umverteilungspunkten kostenintensive wahlfreie Puffer zu installieren, so dass derartige Lösungen sehr unwirtschaftlich sind und damit hier nicht untersucht werden sollen.

Aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen und Zielsetzungen bei offenen und geschlos-  
senen Stationsgrenzen muss im Folgenden für beide Fälle die Methodenentwicklung getrennt erfolgen.

### **2.2.3 Strukturplanung von verteilten Fließproduktionssystemen unter Unsicherheit**

Aufgrund der langfristigen Auswirkungen der Strukturplanung in Form von Investitionen ergibt sich die Notwendigkeit, bereits während der Planungsphase die Auswirkungen sich verändernder Nachfrage zu berücksichtigen. Hierzu dient die Anpassungsplanung, durch die die spätere Nutzung und Anpassung der Anlagen antizipiert wird.

Entscheidungen, die bei der Strukturplanung getroffen werden, lassen sich meist nur mit erheblichem Aufwand wieder rückgängig machen. Besonders im Fall komplexer Fließmontagelinien mit hohen Stückzahlen und umfangreichen Arbeitsinhalten sowie nicht zu vernachlässigenden Investitionen in technische Einrichtungen gilt es daher, die Entscheidungen im Vorfeld abzusichern und die Potenziale unterschiedlicher Konzepte zu bewerten. Dabei spielt im erheblichen Maße auch die Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung der Absatzzahlen und der zu bauenden Varianten eine Rolle, die somit Eingang in das Planungsvorgehen finden muss.

Die Entscheidung für eine bestimmte Montagestruktur kann des Weiteren nicht unabhängig von der zeitlichen Entwicklung der Nachfrage getroffen werden, da bei Änderungen des Produktprogramms Anpassungen auf Strukturebene durchgeführt werden müssen. Trotz der hohen Flexibilität der Montageeinrichtungen ist es nicht möglich, sich beliebig an die wechselnden Stückzahlen anzupassen, da einmal getätigte Investitionen oder Personaleinstellungen nicht uneingeschränkt rückgängig gemacht werden können. Insbesondere im Zusammenhang mit unsicheren Eingangsdaten und schwankenden Produktionszahlen z.B. aufgrund eines Lebenszyklusverlaufes erhöht sich die Komplexität dieser Planungsaufgabe. Es stellt sich die Frage, wann und in welchem Umfang eine Investition durchgeführt wird, da Umbau- und Umorganisationsmaßnahmen auch immer mit Planungsaufwand, Produktionsstillständen und Qualitätsproblemen verbunden sind. Der Zusammenhang, der sich damit zwischen den einzelnen Planungsperioden ergibt, muss daher in der Planungsmethodik berücksichtigt werden.

Da sich der Horizont der Strukturplanung über die gesamte Anlagenlebensdauer erstreckt, sind prognostizierte Stückzahlverläufe für diesen Zeitraum als Eingangsinformation für die Anpassungsplanung zu verwenden. Unter Anpassung wird hier die Abstimmung der quantitativen Kapazität des Produktionssystems mit der Nachfrage verstanden. Die quantitative Kapazität eines Produktionssystems ergibt sich dabei aus der Multiplikation der drei Faktoren Leistungsdauer, Intensität und Kapazitätsquerschnitt (Abbildung 2.17). Die Leistungsdauer gibt die Zeit an, in der das System zur Leistungserbringung genutzt werden kann, während die Intensität die Geschwindigkeit der Leistungserbringung beschreibt. Durch den Kapazitätsquerschnitt wird angegeben, wie viele Kapazitätseinheiten in dem System parallel zur Verfügung stehen.<sup>59</sup>

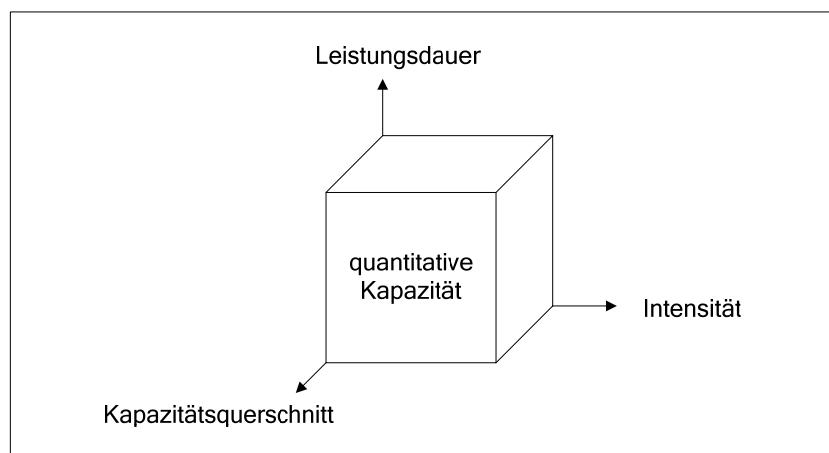


Abbildung 2.17. Determinanten der quantitativen Kapazität<sup>60</sup>

Hieraus lassen sich nach *Krüger* für die Praxis vier Ansätze zur Kapazitätsanpassung in der Montage ableiten:<sup>61</sup>

- Kapazitätsveränderung im Rahmen der Arbeitszeitorganisation
- Technische Kapazitätsveränderung

<sup>59</sup> Vgl. Bundschuh (2008), S. 35f.

<sup>60</sup> Bundschuh (2008), S. 36.

<sup>61</sup> Vgl. Krüger (2004), S. 38ff.

- Personelle Kapazitätsveränderung im Rahmen der Beschäftigungsplanung
- Absatzpolitische Maßnahmen zur Kapazitätsabstimmung

Im Gegensatz zu der in der Literatur häufig untersuchten Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von Montagesystemen auf der Basis von Einzelarbeitsplätzen ist die technische Flexibilität von Fließproduktionssystemen aufgrund der starren Verkettung vergleichsweise beschränkt.<sup>62</sup> So würde die Änderung des Produktionstaktes eine neue Zuordnung der Arbeitsvorgänge auf die Stationen bedeuten, was zu einem erheblichen Planungsaufwand, umfangreichen Umbaumaßnahmen und damit auch zu Produktionsstillständen führen würde.<sup>63</sup> Zu diesen Kosten kommen noch weitere schwer abschätzbare Risiken, die sich aufgrund der großen Ablaufänderungen für die Qualität ergeben. Daher beschränken sich die Anpassungsoptionen in den hier betrachteten Systemen während der Betriebsphase bei einer gegebenen Nachfrage auf Maßnahmen der personellen und organisatorischen Ebene.

Hierbei entsteht aufgrund der unterschiedlichen Kosten der Schichtmodelle ein direkter Zusammenhang mit den in der Planungsphase festgelegten Kapazitäten. Sind während der Planungsphase zu geringe technische Kapazitäten<sup>64</sup> festgelegt worden, wird im Fall erhöhter Nachfrage eine Produktion in teureren Spät- und Nachschichten notwendig sein. Kann die Nachfrage nicht mehr befriedigt werden, kommt es durch nicht verkauft Einheiten zu Deckungsbeitragsverlusten. Um dies zu vermeiden, müssen dann zusätzliche technische Produktionskapazitäten aufgebaut werden (siehe Abbildung 2.18).

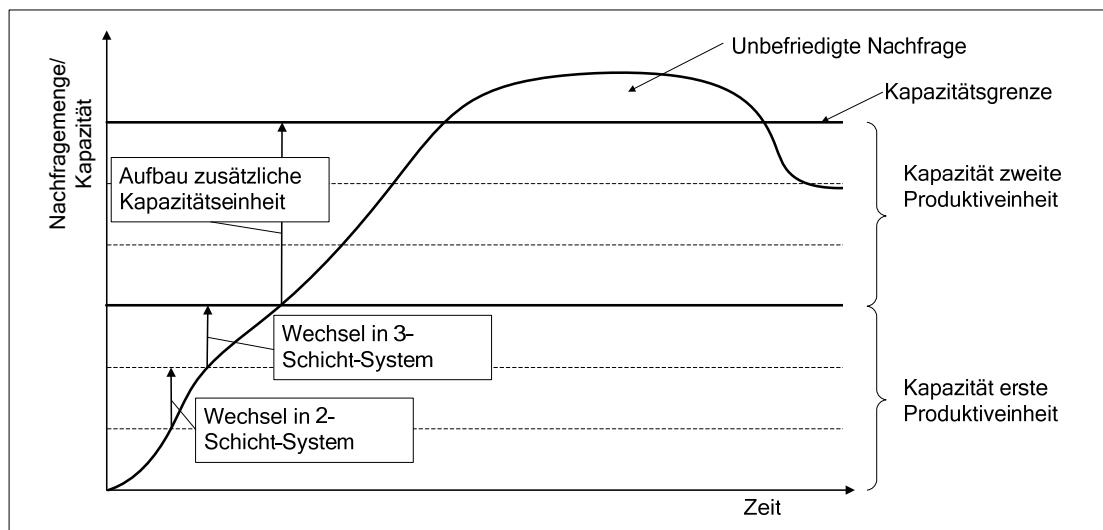


Abbildung 2.18: Prinzip der Kapazitätsanpassung

<sup>62</sup> Der Begriff wird in der Literatur oftmals unterschiedlich verwendet. Zur Diskussion des Begriffes siehe u.a. Sethi; Sethi (1990) und Pibernik (2001). Hier wird der Begriff Flexibilität in Bezug auf Produktflexibilität und Volumenflexibilität verwendet.

<sup>63</sup> Hier sei darauf hingewiesen, dass während des Betriebes einer Linie regelmäßig Umverlagerungen von Stationsinhalten aus Gründen der Anpassung an veränderte Bauraten oder in Folge von Verbesserungsmaßnahmen stattfinden. Demgegenüber steht jedoch bei Änderung des Taktes eine Austaktung aller Stationen, die bzgl. des Aufwandes mit einer Neuplanung gleichgesetzt werden kann.

<sup>64</sup> ausgedrückt durch den Takt.

Die Erweiterung der technischen Kapazität in Fließproduktionsliniensystemen erfolgt dabei durch Aufbau zusätzlicher Strukturelemente in Form von Produktionslinien. Während der Festlegung der Struktur eines Produktionssystems gilt es somit, Maßnahmen der Struktur anpassung bereits in der Planungsphase zu antizipieren. Aufgabe der Anpassungsplanung ist es daher zu bestimmen, zu welchen Zeitpunkten die Anpassungsentscheidungen umgesetzt werden müssen (siehe Abbildung 2.19). Daraus lässt sich für die folgenden Planungsschritte ableiten, wann diese Investitionen entsprechend vorzubereiten sind.

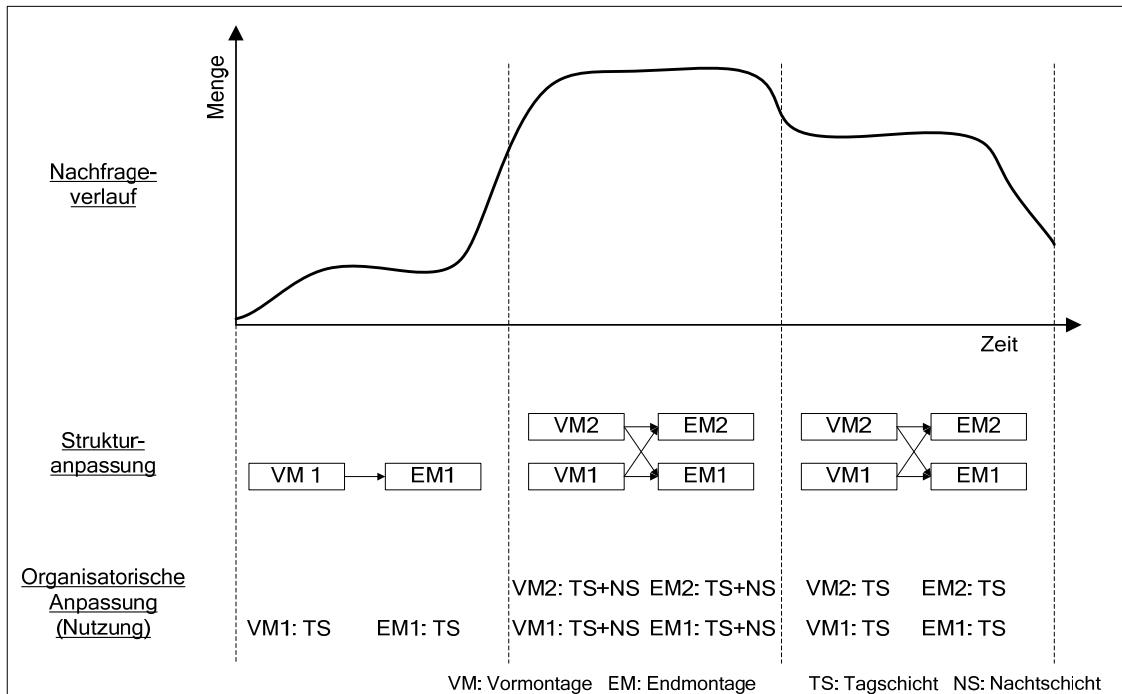


Abbildung 2.19: Anpassung der Struktur und organisatorische Anpassung

Da sich die Strukturplanung auf einen Zeitraum bezieht, für den keine verlässlichen Nachfragermengen vorliegen, muss eine Unsicherheit bereits während der Planung berücksichtigt werden. Meist liegt für die Planung nur ein Planszenario vor, das den wahrscheinlichsten Nachfrageverlauf wiedergeben soll. Demgegenüber können jedoch auch andere Stückzahlverläufe angenommen werden, die zur Überprüfung des Planungsergebnisses herangezogen werden können (z.B. im Fall einer sehr pessimistischen Annahme, dem „worst case“ oder dem optimistischsten Fall, dem „best case“, siehe Abbildung 2.20).

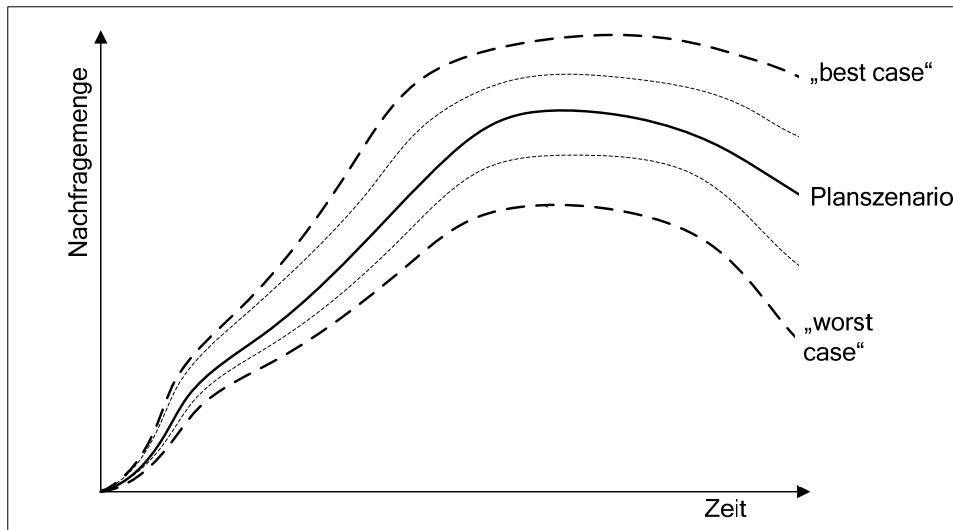


Abbildung 2.20: Unsicherheit der Stückzahlverläufe

Die Schwierigkeit hierbei ist, dass zu einem Zeitpunkt der Entscheidung über die technischen Eigenschaften des Produktionssystems noch keine genauen Aussagen über die Nachfrage gemacht werden können. Dennoch sollte diese Unsicherheit Inhalt einer Planungssystematik sein und nicht nur für Ex-Post-Betrachtungen herangezogen werden. Daher ist bereits in der Planung zu antizipieren, wie die spätere Programmplanung auf eine tatsächlich eintretende Nachfragermenge reagieren wird, da die Kosten während der Betriebsphase von Entscheidungen dieser Ebene beeinflusst werden (siehe Abbildung 2.21).

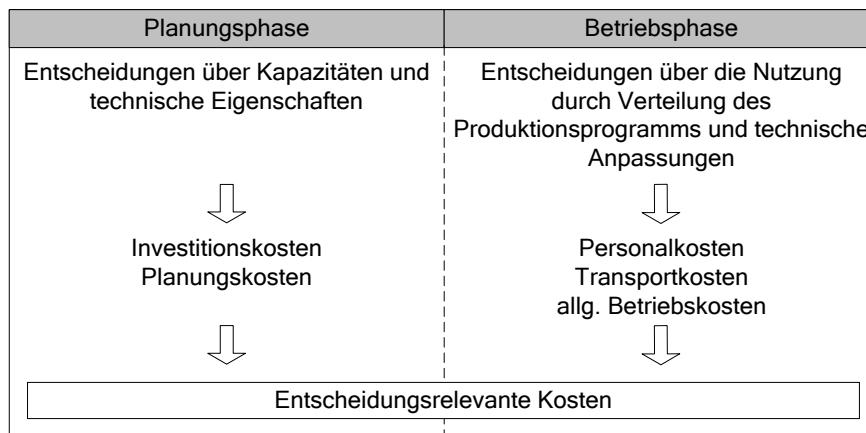


Abbildung 2.21: Zeitliche Zuordnung der entscheidungsrelevanten Kosten

Während der Strukturplanung muss also zu einem Zeitpunkt der Unsicherheit über die zukünftige Nachfrageentwicklung sichergestellt werden, dass alle nicht revidierbaren Entscheidungen so getroffen werden, dass eine möglichst kostengünstige Anpassung an eine tatsächlich eintretende Nachfrage möglich ist. Zu diesen nicht-revidierbaren Entscheidungen gehören vorrangig die Kapazitäts- und Flexibilitätsentscheidungen bezüglich der Struktureinheiten in Form der Produktionslinien. Somit ergibt sich bei der Strukturplanung unter Unsicherheit folgende Fragestellung:

- Zu welchen Zeitpunkten sind bei unsicherer Nachfrage welche Struktureinheiten bereitzustellen und welche Kapazitäten sollen diese besitzen?

## 2.3 Anforderungen an die Verfahren zur Strukturplanung

Nachdem die Beschreibung der Planungsaufgaben erfolgt ist, können nun die Anforderungen an geeignete Planungsverfahren formuliert werden. Die Auflistung wird getrennt für die drei Eingangsfragestellungen vorgenommen.

### 2.3.1 Anforderungen an ein Verfahren zur Planung von Fließproduktionsstrukturen bei geschlossenen Stationsgrenzen

Als Anforderungen an ein Planungsverfahren für Fließproduktionssysteme mit geschlossenen Stationsgrenzen können die folgenden Punkte genannt werden:

- Entwicklung eines Verfahrens für die Grobplanungsebene

Das zu entwickelnde Verfahren wird der Grobplanungsphase zugeordnet. Eine detaillierte Austaktung und Feinplanung der Arbeitsplätze erfolgt in diesem Schritt noch nicht. Dennoch sind diese Planungsschritte bereits hier soweit zu antizipieren, dass kostenrelevante Eigenschaften abgeleitet werden können.

- Simultane Planung der horizontalen und vertikalen Teilung

Wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, müssen beide Teilungsformen gleichzeitig betrachtet werden, da die Kosten, die sich durch die beiden Teilungsformen ergeben voneinander abhängen. Das zu entwickelnde Verfahren muss also in der Lage sein, die beiden Entscheidungen im Zusammenhang zu lösen.

- Berücksichtigung der Arbeitskosten

Als ein bedeutender Kostentreiber bei variantenreichen Fließproduktionslinien wurden die Taktverluste identifiziert. Daher soll das Verfahren in der Lage sein, die entstehenden Arbeitskosten während des Betriebes abzuschätzen und in der Entscheidung zu berücksichtigen.

- Berücksichtigung der Investitionskosten

Durch die Systemteilung kann es dazu kommen, dass Ressourcen mehrfach angeschafft werden müssen. Ebenso entstehen zusätzliche Kosten für die Einrichtung der Materialflusstechnik an den Auf trennungspunkten. Diese Kosten müssen in der Methode abbildbar sein.

- Nutzung von IT-Systemen zur schnellen Abänderbarkeit der Prämissen und Eingangsdaten muss möglich sein

Da während der Grobplanungsphase oftmals Änderungen an Planungsprämissen vorgenommen werden, sollten diese Daten innerhalb eines IT-Systems gepflegt werden, da die Änderungen so einfach übernommen werden können und eine einheitliche Datenbasis zur Verfügung steht.

- Anforderung an die Rechenzeit

Aufgrund der entstehenden Kombinatorik der möglichen Entscheidungen und der daraus resultierenden Komplexität der Berechnungen sollen die Planungsalgorithmen mit Hilfe geeigneter Softwaresysteme umgesetzt werden können. Die Lösungsgenerierung sollte auf üblichen PCs innerhalb weniger Minuten möglich sein.

### **2.3.2 Anforderungen an ein Verfahren zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen**

Als Anforderungen an ein Planungsverfahren für Fließproduktionssysteme mit offenen Stationsgrenzen können die folgenden Punkte genannt werden:

- Planung der horizontalen Teilung des Produktionssystems

Aufgrund der notwendigen Reihenfolgeplanung bei offenen Stationsgrenzen wird an Aufspaltungs- und Zusammenführungspunkten der Fließproduktionslinien die Installation aufwändiger wahlfreier Puffer notwendig. Auf die vertikale Teilung bei offenen Stationsgrenzen wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Hier soll nur die Möglichkeit der horizontalen Teilung in parallele Linien untersucht werden.

- Bestimmung der Kapazität und Flexibilität der Linien

Wird im Fall paralleler Linien aus Kostengründen eine Einschränkung der Flexibilität der Linien vorgenommen, muss zum Zeitpunkt der Strukturplanung untersucht werden, ob eine ausreichende Flexibilität vorliegt. Ein entsprechender Ansatz soll im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt werden.

- Zuordnung der konkreten Kundenaufträge auf operativer Ebene

Ist das Liniensystem gegeben, ist die Aufgabe der Auftragszuordnung zu lösen. Wie gezeigt wurde, sollte bei offenen Stationsgrenzen versucht werden, die Aufträge so auf Linien zuzuordnen, dass die Schwankungen der Bearbeitungszeiten in den einzelnen Montageabschnitten bzw. an den einzelnen Stationen möglichst gering sind. Da die tatsächlichen Bearbeitungszeiten aber erst bei Vorliegen eines konkreten Kundenauftrages bestimmt werden können, soll das Verfahren zur Auftragszuordnung in der operativen Planung einsetzbar sein.

- Zuordnung soll einem geeigneten Zielkriterium genügen

Aufgrund der Komplexität der Entscheidung wird von einer simultanen Auftragszuordnung und Reihenfolgeplanung abgesehen und ein Ersatzzielkriterium verwendet. Wie in der Problembeschreibung dargestellt, kann hierfür die Streuung bzw. die Varianz der Bearbeitungszeiten in den einzelnen Bearbeitungsabschnitten herangezogen werden. Ein geeignetes Verfahren soll die Aufträge unter Berücksichtigung dieses Zielkriteriums möglichst optimal zuordnen.

- Umsetzbarkeit der Verfahrens in Form eines IT-Systems

Aufgrund des Datenvolumens (beispielsweise mehrere hundert Aufträge pro Tag in der Automobilproduktion) ist eine Umsetzbarkeit des Verfahrens in einem IT-System notwendig.

- Anforderung an die Rechenzeit

Aufgrund der sich aus der Zuordnungsproblematik des Verfahrens ergebenden Komplexität ist es notwendig, bei der Entwicklung des Verfahrens auf akzeptable Rechenzeiten für reale Problemgrößen zu achten. Um das Verfahren in der operativen Planung einsetzen zu können, sollen die Rechenzeit für ein Tagesprogramm maximal im Minutenbereich liegen.

### 2.3.3 Anforderungen an ein Verfahren zur Planung von verteilten Fließproduktionssystemstrukturen unter Unsicherheit

Als Anforderungen an ein Planungsverfahren für verteilte Fließproduktionssystemstrukturen unter Unsicherheit können die folgenden Punkte genannt werden:

- Abbilden der Entscheidungssituation unter Unsicherheit

Die Entscheidungen über die Installation der technischen Einrichtungen müssen zu einem Zeitpunkt der Unsicherheit bezüglich der Nachfragezahlen erfolgen. Spätere Anpassungsentscheidungen auf der Ebene der Kapazitätsnutzung werden jedoch bei Kenntnis der tatsächlich eingetretenen Nachfrage getroffen. Diese beiden Entscheidungsebenen sollen daher innerhalb des Verfahrens abgebildet werden.

- Unabhängigkeit von der Art der Stationsgrenzen

Das Verfahren soll sowohl für Fließproduktionslinien mit offenen als auch geschlossenen Stationsgrenzen anwendbar sein. Die unterschiedliche Zusammensetzung der Arbeitskosten muss daher hier in Form der Betriebskosten aggregiert werden.

- Berücksichtigung aller relevanten Kostenarten

Im Fall von über mehrere Standorte verteilten Strukturen fließen neben den Arbeits- und Investitionskosten auch die Transportkosten zwischen den Strukturelementen in die Entscheidung ein. Das zu entwickelnde Verfahren soll daher alle relevanten Kostenarten enthalten.

- Berücksichtigung des Zeitpunktes der Ausgaben

Bei betriebswirtschaftlichen Entscheidungen für längere Zeiträume muss die Verzinsung des eingesetzten Kapitals berücksichtigt werden. Die entsprechende Abzinsung ist dazu in das Verfahren zu integrieren.

- Berücksichtigung der veränderlichen Stückzahlen im Zeitverlauf

Bei sich verändernden Stückzahlen im Zeitverlauf müssen die Anpassungsmöglichkeiten des Produktionssystems beachtet werden. Dazu gehören Produktionsprogramm-

scheidungen, Anpassung der Kapazitäten durch organisationelle Maßnahmen sowie der Aufbau zusätzlicher Linien. Diese Entscheidungen sollten in dem Verfahren durch Kostensätze für die einzelnen Maßnahmen berücksichtigt werden.

- Bestimmung der optimalen Anpassung erfolgt bezüglich Kosten

Die Entscheidungen über die optimalen Anpassungsoptionen sollte anhand der entstehenden Gesamtkosten getroffen werden.

- Anforderung an die Rechenzeit

Aufgrund der Komplexität, die sich aus der Kombinatorik der einzelnen Aufbau- und Anpassungsentscheidungen ergibt, sind bei realitätsnahen Problemgrößen hohe Rechenzeiten bei der Lösungsbestimmung zu erwarten. Da das Planungswerkzeug in der taktischen Planung eingesetzt wird, können für praxisrelevante Problemgrößen Rechenzeiten von ein bis zwei Stunden akzeptiert werden.

### 3 Stand der Technik

Die Darstellung des Stands der Technik erfolgt entsprechend der im vorangegangenen Kapitel entwickelten Aufteilung getrennt für die drei Planungsprobleme.

#### 3.1 Stand der Technik zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen bei geschlossenen Stationsgrenzen

Wie gezeigt wurde, sind bei der Strukturplanung von Fließproduktionslinien mit geschlossenen Stationsgrenzen geeignete Systemtrennungen zu bestimmen. Gleichzeitig sind die Produktvarianten den einzelnen Systemelementen zuzuordnen. Durch die Möglichkeit, bereits in der Strukturplanungsphase anhand dieser Zuordnungen Montagezeitspreizungen und Betriebsmittel in den Systemelementen zu ermitteln, sind hier Kostenbewertungen durchführbar. Daher wird eine kostenoptimale Systemteilung angestrebt.

Als Lösungsansätze bieten sich sowohl spezielle Zuordnungsalgorithmen, die an die Clusteranalyse angelehnt sind, als auch Modelle der mathematischen Programmierung an. Im Folgenden sollen daher zunächst vorhandene Verfahren zur Strukturierung von Montagesystemen vorgestellt werden, bevor in einem zweiten Teil auf die Möglichkeiten der mathematischen Programmierung zur Modellierung und Lösung von Entscheidungsproblemen eingegangen wird.

##### 3.1.1 Vorhandene Verfahren zur Montageplanung

###### 3.1.1.1 Leitfäden zur Montage- und Fabrikplanung

Generell kann sich die Planung von Montagesystemen an den Leitfäden orientieren, wie sie beispielsweise von *REFA*, *Bullinger*, *Lotter* oder *Metzger* beschrieben werden.<sup>65</sup> Hier wird direkt auf die Notwendigkeit einer Strukturierung des Produktionssystems auf Basis einer Analyse des Produktionsprogramms hingewiesen, eine Beschreibung anwendbarer mathematischer Methoden erfolgt jedoch nicht. Allgemeine Zielsetzungen und Vorgehensweisen zur Strukturierung von Produktionssystemen lassen sich aus den Ansätzen zur Fabrikorganisation ableiten. Erwähnenswerte Ansätze in diesem Zusammenhang finden sich beispielsweise bei *Skinner* oder *Warnecke*<sup>66</sup>, die zur Komplexitätsbegrenzung innerhalb einer Fabrik eine Zusammenfassung ähnlicher Produkte und Produktionsprozesse in voneinander unabhängigen Produktionseinheiten fordern. Auch hier werden jedoch keine konkreten Algorithmen vorgeschlagen.

---

<sup>65</sup> Vgl. REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (1993); Bullinger (1986); Lotter et al. (1998); Metzger (1977). Zum allgemeinen Ablauf der Strukturplanung siehe Kap. 2.2.

<sup>66</sup> Vgl. Skinner (1974); Warnecke (1992).

### 3.1.1.2 Das Cellular Manufacturing Problem

Ein Forschungsfeld, das sich ebenfalls mit der Strukturierung von Produktionsbereichen beschäftigt, ist das Cellular Manufacturing Problem. Ziel hierbei ist es, Produktfamilien optimal zu Fertigungseinrichtungen zuzuordnen. Für jede Produktfamilie ist bekannt, welche Operationen zur Fertigstellung benötigt werden. Ebenso ist die Information gegeben, welche Maschinen welche der Operationen durchführen können. Bei der Zuordnung können nun unterschiedliche Ziele verfolgt werden.<sup>67</sup>

- Minimierung der Transportkosten
- Optimierung der Anzahl von Maschinen und Transportvorgängen
- Maximierung der Kompatibilität von Produkten und Maschinen
- Minimierung der Auslastungsunterschiede zwischen den Maschinen

Das Zuordnungsproblem wurde bereits vielfach untersucht und sowohl exakte als auch heuristische Verfahren zur Lösung vorgeschlagen.<sup>68</sup> Die Formulierungen des Zuordnungsproblems sowie die Verwendung einer kostenbasierten Zielfunktion treffen auch auf das hier beschriebene Problem bei getakteter Fließproduktion zu. Allerdings werden die spezifischen Eigenschaften wie Zeitspreizungen und Systemteilungen nicht berücksichtigt und führen zu einer erheblichen Veränderung der Modellformulierung.

### 3.1.1.3 Dittmayer

Ein grafisches Verfahren zur Kapazitätsteilung in der Montage liefert *Dittmayer*.<sup>69</sup> In der Arbeit wird eine grafische Methode entworfen, mit der die Planung von Arbeitssystemen mit mehreren Montagearbeitsplätzen unterstützt wird. In einem Diagramm mit den Dimensionen Tagesmenge und Stückzeit können zusätzlich zu den bekannten Teilungsformen nach Menge und Art des Produktionsprogramms auch gemischte Formen der Kapazitätsteilung abgebildet werden.<sup>70</sup> Das Verfahren kann nur zur Darstellung der Systemteilung verwendet werden, jedoch stellt *Dittmayer* auch eine Reihe von Leitlinien vor, die zur Konstruktion der Teilung angewendet werden können. Eine exemplarische Anwendung des Verfahrens findet ebenfalls statt, wobei die Berechnung verschiedener relevanter Kennzahlen im Anschluss durchgeführt wird. Daher kann mit dem Verfahren keine automatische Generierung von Montagestrukturen erfolgen. Des Weiteren werden in dem Verfahren weder unterschiedlichen Varianteneigenschaften bei der Zuordnung auf parallele Kapazitätseinheiten noch Ressourceneinschränkungen berücksichtigt.

---

<sup>67</sup> Vgl. Lashkari; Raja Gunasingh (1990).

<sup>68</sup> Zum Manufacturing Cell Formation Problem siehe u.a. Shanker; Agrawal (1997); Gupta (1993); Adil et al. (1996).

<sup>69</sup> Dittmayer (1981).

<sup>70</sup> Siehe dazu auch Abbildung 2.7.

### 3.1.1.4 Koether

Speziell auf getaktete Automobilendmontagelinien geht *Koether* ein, der sich in seiner Arbeit mit der Verringerung von reihenfolgeabhängigen Verlusten beschäftigt.<sup>71</sup> Neben der Entwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur Bestimmung möglichst kostenoptimaler Reihenfolgen beschäftigt er sich auch mit der Montagestruktur der Endmontage. Er schlägt vor, das Montagesystem in parallele, entkoppelte Montageboxen aufzulösen, zwischen denen der Transport mit fahrerlosen Transportsystemen vorgenommen wird. Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit wendet er eine Simulationsuntersuchung und eine Kostenabschätzung an. Eine Methode zur Generierung alternativer Strukturen und damit zur Untersuchung unterschiedlicher Teilungsformen wird nicht vorgeschlagen.

### 3.1.1.5 Schmidt

*Schmidt* untersucht in seiner Arbeit gruppenorientierte Arbeitsstrukturen in der Automobilendmontage.<sup>72</sup> Die Auswirkungen der Gruppenstrukturen, die durch das Zusammenlegen mehrerer Stationen entstehen, werden dabei mit Hilfe eines eigenen Simulationsprogramms untersucht. Vorteile ergeben sich durch die Integration von Vormontageinhalten, die zum einen zur Erhöhung der durchschnittlichen Auslastung dienen und zum anderen einen verbesserten Belastungsausgleich ermöglichen. Er zeigt auf, dass die Vorteilhaftigkeit dieses Ansatzes jedoch stark von der vorliegenden Variantenvielfalt und der gewählten Gruppenstruktur und -größe abhängen. Das Verfahren kann somit zur Simulation und Bewertung von unterschiedlichen Organisationsprinzipien innerhalb einer gegebenen Linie eingesetzt werden, eine Möglichkeit zur Generierung und Untersuchung von unterschiedlichen Linienstrukturen ist jedoch nicht gegeben.

### 3.1.1.6 Kratzsch

*Kratzsch* befasst sich ebenfalls mit der Gestaltung von Fließproduktionslinien für die Automobilendmontage.<sup>73</sup> Sie stellt ein mehrstufiges Bewertungsverfahren vor, in dem u.a. die Kosteneffekte unterschiedlicher Strukturkonzepte berücksichtigt werden. Das Verfahren beschränkt sich auf die Zusammenstellung von Kosten und liefert keine Unterstützung bei der Bestimmung der Struktureinheiten.

### 3.1.1.7 Gottschalk

*Gottschalk* fügt in seiner Arbeit verschiedene Methoden zur Komplexitätsbeherrschung in der Montage zu einem Vorgehensmodell zusammen, wobei er auch auf die Möglichkeit zur Mengen- und Artteilung zur Varianzverringerung auf parallelen Kapazitätseinheiten eingeht, die er Kapazitätsstrukturierung nennt.<sup>74</sup> Ein mathematisches Verfahren wird nicht entwickelt.

In einem Beispiel wird auf die Möglichkeiten zur Einrichtung von parallelen Montagebändern in der automobilen Endmontage eingegangen. Es wird ein Verfahren zur Bestimmung der not-

---

<sup>71</sup> Koether (1986).

<sup>72</sup> Schmidt (1990).

<sup>73</sup> Kratzsch (2000).

<sup>74</sup> Gottschalk (2006).

wendigen Variantenflexibilität auf den Linien vorgeschlagen, das auf der Untersuchung der entstehenden Fehlmengen bei unterschiedlichen Nachfrageszenarien beruht. In dem Beispiel wird ebenfalls auf die Verringerung der Belastungsschwankungen bei Teilung des Produktionsprogramms auf die vorhandenen parallelen Produktionslinien hingewiesen. Die Auftragszuordnung soll dabei anhand der Standardabweichung der Stationszeiten der einzelnen Aufträge stattfinden. Hier wird jedoch kein konkreter Zuordnungsalgorithmus vorgestellt.

### 3.1.1.8 Zeile

*Zeile* beschäftigt sich in seiner Arbeit mit der Strukturplanung in automatisierten Montagesystemen.<sup>75</sup> Er entwickelt ein Verfahren, das mit Hilfe von Algorithmen die Entwicklung von Montagestrukturen unterstützen soll. Die Vorgehensweise gliedert sich dabei in drei Teilaufgaben. Im ersten Schritt werden die Arbeitsinhalte der Stationen anhand clusteranalytischer Verfahren bestimmt und eine Aufbaustruktur des Montagesystems festgelegt. Hierbei können auch unterschiedliche Erzeugnisvarianten berücksichtigt werden. Im zweiten Schritt erfolgt die Ermittlung der Verkettungsstruktur mit Hilfe von Verfahren der Graphentheorie. Hier werden die Verkettungsabschnitte und die Anordnung von Materialflussknoten, die Festlegung der Anordnungsstruktur, des Transfer- und des Materialflussprinzips sowie die Anordnung und überschlägige Dimensionierung von Puffern vorgenommen. Abschließend werden verschiedene Lösungsalternativen durch einen Gesamtkostenvergleich bewertet. Das Verfahren ist aufgrund der Tatsache, dass Einzelarbeitsstationen betrachtet werden, die über Puffer entkoppelt sind und Nebenflüsse zulassen, nicht direkt auf eine getaktete Fließproduktion übertragbar.

### 3.1.1.9 Müller

Das Verfahren von *Müller* zur Strukturplanung von hybriden Montagesystemen führt eine Zuordnung von Prozessen auf Stationen durch.<sup>76</sup> Dazu wird eine Vorgehensweise entwickelt, die einen mehrschichtigen Vorranggraphen verwendet. Die Montageaufgabe wird dabei in den drei Sichten Mensch, Betriebsmittel und Arbeitsgegenstand dargestellt. Die Methodik umfasst die Planungsschritte von der Grobstrukturierung bis zur Austaktung. Es werden jedoch keine unterschiedlichen Varianten betrachtet, die zu einer Zeitspreizung an den Montagestationen führen könnten.

### 3.1.1.10 Merz

Ein umfassenderer Ansatz, mit dem eine Strukturierung des Montagesystems auf verschiedenen Planungsebenen unterstützt werden soll, findet sich bei *Merz*.<sup>77</sup> Die Aufteilung der Varianten auf verschiedene Montagesysteme wird dabei durch Bestimmung von Distanzmaßnahmen zwischen den Varianten anhand der Teileähnlichkeiten und einer anschließenden Clusteranalyse gelöst. Die Ausgliederung von Montageinhalten in Vormontagen findet anhand der Automatisierbarkeit und des Komplexitätsgrades der Prozesse statt. Taktverluste werden in dem Verfahren nicht berücksichtigt.

---

<sup>75</sup> *Zeile* (1995).

<sup>76</sup> *Müller* (2002).

<sup>77</sup> *Merz* (1987).

### 3.1.1.11 Nachtwey et al.

*Nachtwey et al.* schlagen in ihrer Veröffentlichung ebenfalls ein Clusteringverfahren zur Strukturierung von Produktionsbereichen vor.<sup>78</sup> Das entwickelte Verfahren gliedert ein gegebenes Produktionsprogramm mittels einer Clusteranalyse. Die so bestimmten Teilefamilien sollen auf den gleichen Produktiveinheiten gefertigt werden, womit aufgrund der Ähnlichkeiten der Fertigungsprozesse eine effizientere Produktion ermöglicht wird. Eine Übertragbarkeit auf die speziellen Anforderungen von getakteten Montagelinien wird nicht angesprochen.

### 3.1.1.12 Nöth

Ein weiteres Verfahren zur Strukturierung von Produktionsprozessen stellt *Nöth* vor.<sup>79</sup> Er befasst sich in seiner Arbeit mit der Optimierung der automobilen Wertschöpfungskette. Ausgehend von dem Ansatz, dass ähnliche Fertigungsprozesse möglichst von denselben Akteuren durchgeführt werden sollten um Spezialisierungsvorteile nutzen zu können, wendet er ein auf einem Genetischen Algorithmus basierendes Clusteringverfahren an. Dabei können sowohl Teilungen entlang der Wertschöpfungskette als auch innerhalb der Wertschöpfungsstufen entstehen. Das Verfahren basiert auf einer Ähnlichkeitsanalyse, so dass anschließend die Ergebnisse für verschiedene Bewertungskriterien diskutiert werden müssen.

## 3.1.2 Mathematische Programmierung als Lösungsansatz für Entscheidungsprobleme

Das Planungsproblem der Strukturplanung ist durch eine Vielzahl simultan zu treffender Entscheidungen gekennzeichnet. Gleichzeitig lassen sich alle Entscheidungen durch ihre Auswirkung auf die Gesamtkostenfunktion beurteilen. Gesucht ist somit die Kombination von Entscheidungen, die zu minimalen Gesamtkosten führt. Zur Modellierung und Lösung derartiger Probleme bietet sich die mathematische Programmierung an, deren Grundlage ein mathematisches Modell der Problemstellung ist.<sup>80</sup>

Generell kann ein Modell als Abbildung der Realität in Form eines Systems analytischer Aussagen verstanden werden. Im Fall von Entscheidungs- und Planungsmodellen liegt der Schwerpunkt auf der Unterstützung der Entscheidungsfindung bei komplexen Planungsproblemen. Diese Modelle setzen sich aus den Teilsystemen des Entscheidungsfeldes und der Bewertung zusammen. Das Entscheidungsfeld enthält die Menge möglicher Entscheidungen in Form von Entscheidungsvariablen, wobei der Wertebereich dieser Entscheidungsvariablen durch Restriktionen eingeschränkt und kontinuierlich, ganzzahlig oder binär sein kann. Das Bewertungssystem dient der Bewertung der Entscheidungen, beispielsweise auf Grundlage von Kosten oder Nutzen. Mit Hilfe des Bewertungssystems sind die Entscheidungen anhand eines Zielfunktionswertes zu vergleichen und in eine Reihenfolge zu bringen. Die Minimierung oder Maximierung eines Zielfunktionswertes wird dabei im Allgemeinen als „mathematische Programmie-

---

<sup>78</sup> Nachtwey et al. (2007).

<sup>79</sup> Nöth (2004).

<sup>80</sup> Zu Grundlagen mathematischer Optimierung siehe Suhl; Mellouli (2006).

rung“ bezeichnet. Ein solches mathematisch formuliertes Entscheidungsmodell kann auch als operables Modell bezeichnet werden.<sup>81</sup>

Die Lösung des Modells erfolgt mit Hilfe eines geeigneten Optimierungsverfahrens, das abhängig von der Struktur der Zielfunktion, der Restriktionen und den Variablen zu wählen ist. Allgemein wird zwischen linearen, nicht-linearen und gemischt-ganzzahligen Modellen unterschieden. Bei einem linearen Modell bilden die Zielfunktion und alle Restriktionen Linearkombinationen mit den Entscheidungsvariablen. Zur Lösung dieser Modelle werden Lösungstechnologien der linearen Programmierung verwendet. Probleme, die eine Teilbarkeit von mindestens einer Variablen nicht zulassen, werden als gemischt-ganzzahlige Modelle bezeichnet. Diese Modelle unterscheiden sich von linearen durch zusätzliche Bedingungen, bei denen mindestens eine der Variablen einer Ganzahligkeitsbedingung unterliegt. Solche Bedingungen sind zum Beispiel bei der Zuordnung von Produktionsmengen auf eine Kapazitätseinheit erforderlich.

Bei der mathematischen Programmierung ist sicherzustellen, dass die Modelle auch für Standardlösungsverfahren geeignet sind, indem beispielsweise eine Linearisierung vorgenommen wird. Dafür bietet sich hier Vorteil, dass auf relativ einfache Weise weitere Nebenbedingungen und Kostenbestandteile in das Entscheidungsmodell integriert werden können.

## 3.2 Stand der Technik zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen

Aus der Problembeschreibung der Strukturplanung von Fließproduktionssystemen bei offenen Stationsgrenzen wurden in Kapitel 2.2.2 zwei Aufgaben identifiziert.

Da zum Zeitpunkt der Strukturplanung noch keine Aussage zu den späteren tatsächlichen Kundenaufträgen gemacht werden können, können diese auch noch nicht den Linien zugeordnet werden. Dennoch können hier Überlegungen angestellt werden, parallele Montagelinien einzurichten, um beispielsweise eine Mindesttaktzeit nicht zu unterschreiten oder Spät- und Nachschichten zu vermeiden. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, nicht alle parallelen Linien vollständig flexibel auszulegen, um bestimmte teure Betriebsmittel nicht in allen Linien installieren zu müssen. Hier ist sicherzustellen, dass ein ausreichender Flexibilitätsgrad zur Verfügung steht und während der Betriebsphase ausreichende Kapazitäten zur Verfügung stehen. Für Methoden zur Flexibilitätsplanung sei an dieser Stelle auf die in Kapitel 3.3 vorgestellten Verfahren verwiesen.

Die zweite hier untersuchte Planungsaufgabe bei parallelen Fließproduktionslinien mit offenen Stationsgrenzen ist die Zuordnung von Aufträgen auf die Linien. Als Ziel wurde die Verringerung der Bearbeitungszeitvarianzen identifiziert, aus der eine Verbesserung der Sequenzierung und der Kapazitätsnutzung abgeleitet werden kann.

Da es sich bei dem beschriebenen Problem um ein Auftragszuordnungsproblem handelt, sollen zunächst vorhandene Ansätze aus der Maschinenbelegungsplanung auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft werden. Aufgrund der bereits beschriebenen Problemstruktur bietet es sich in einem

---

<sup>81</sup> Vgl. Dangelmaier (2003), S. 232.

zweiten Schritt an, Verfahren der Datenanalyse, wie sie beispielsweise beim Clustering angewendet werden, auf ihre Übertragbarkeit auf das vorliegende Problem zu untersuchen.

### 3.2.1 Ansätze der Maschinenbelegungsplanung

Aufgabe der Maschinenbelegungsplanung ist es, die genaue Verteilung und Reihenfolgebildung der Fertigungsaufträge auf einzelne Fertigungszentren in einem Produktionsbereich vorzunehmen.<sup>82</sup> Das Problem der Auftragszuordnung lässt sich somit in das Maschinenbelegungsproblem überführen, wenn die parallelen Montagelinien jeweils als einzelne Maschine betrachtet werden, der Produktionsaufträge zuzuordnen sind. Wie bereits in der Problembeschreibung dargestellt, schließt sich die Reihenfolgeplanung an die Auftragszuordnung an, so dass die Zuordnung zunächst ohne eine Beachtung der Reihenfolgen erfolgen kann.

Im Folgenden soll geprüft werden, ob Gemeinsamkeiten zwischen den Zielen der Maschinenbelegungsplanung und den Zielen der hier vorzunehmenden Auftragszuordnung vorliegen. Trifft dies zu, können Teile der entsprechenden Verfahren für das vorliegende Problem übernommen werden.

Die Ziele der Maschinenbelegungsplanung wurden in der Literatur bereits vielfach diskutiert und untersucht. So ordnet *Rixen* die zu optimierenden Ziele in drei Arten ein:<sup>83</sup>

- Marktorientierte Ziele:
  - mittlere Wartezeit
  - mittlere Durchlaufzeit
  - mittlerer Fertigstellungstermin
- Kundenorientierte Ziele:
  - mittlere Terminabweichung
  - mittlere Verspätung
  - mittlere absolute Terminabweichung
- Kapazitätsorientierte Ziele:
  - mittlere Leerzeit
  - mittlere Kapazitätsauslastung
  - mittlerer Bestand zu bearbeitender Aufträge

Für den Fall von Konfliktsituationen schlägt Rixen den Einsatz von Prioritätsregeln vor, die er in statische und dynamische Regeln unterteilt.<sup>84</sup> Bei den statischen Regeln werden Kriterien wie die kürzeste Bearbeitungszeit oder der früheste Liefertermin verwendet. Ein Beispiel für eine

---

<sup>82</sup> Vgl. Höck (1998), S. 25; Adam (1998), 605ff.

<sup>83</sup> Vgl. Rixen (1997), S. 15ff.

<sup>84</sup> Vgl. Rixen (1997), S. 47ff.

dynamische Prioritätsregel ist die Verwendung des Kriteriums der kürzesten verbleibenden Zeit eines Auftrags.

Ähnlich geht *Teich* vor, der die in der Produktion anfallenden Kosten an Zeitgrößen gebunden sieht. Als zu minimierende Zielgrößen nennt er:<sup>85</sup>

- Durchlaufzeiten
- Zykluszeiten eines gegebenen Produktionsprogramms
- Wartezeiten
- Liegezeiten
- Terminüberschreitungszeiten
- Leerzeiten

Auch *Teich* nennt Prioritätsregeln, die in Konfliktsituationen verwendet werden können. Diese sind:<sup>86</sup>

- Wartezeit-Regel (FIFO-Regel): „First In, First Out“; zuerst in das System gebrachte Aufträge werden zuerst bearbeitet.
- Kürzeste Operationszeit-Regel (KOZ-Regel): Der Auftrag mit der kürzesten Bearbeitungszeit wird zuerst bearbeitet.
- Liefertermin-Regel (LT-Regel): Der Auftrag mit dem frühesten Liefertermin wird vorgezogen.
- Schlupfzeit-Regel (SZ-Regel): Der Auftrag mit der geringsten verfügbaren Wartezeit wird priorisiert.

*Trautmann* wendet die Ansätze der Maschinenbelegungsplanung auf die Prozessindustrie an und verwendet dafür den Begriff der Anlagenbelegungsplanung. Auch er nennt als Ziele der Belegungsplanung die Optimierung von Zykluszeit, Termineinhaltung sowie die Minimierung von Verspätungen, reihenfolgeabhängigen Umrüstkosten, Kapitalbindungskosten und der benötigten Kapazitäten.<sup>87</sup>

Betrachtet man die Ziele und Verfahren der Maschinenbelegungsplanung, so wird deutlich, dass sie sich nicht direkt auf das Problem der Auftragszuordnung in Fließproduktionslinien anwenden lassen. Dies liegt darin begründet, dass diese Verfahren ursprünglich für Werkstattfertigungen entwickelt wurden. Durchlaufzeitorientierte Ziele sind bei getakteten Fließproduktionslinien nur wenig sinnvoll, da die Durchlaufzeit der Linie durch den Takt bestimmt wird und auftragsunabhängig ist. Auch die Minimierung der Zykluszeit kann auf den hier betrachteten Fließproduktionslinien nicht angewendet werden, da hier bereits eine Produktion mit Losgröße 1 vorliegt. Ähnliches gilt für die Minimierung von reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten, da in flexiblen Montagelinien keine Umrüstvorgänge auftreten.

---

<sup>85</sup> Vgl. Teich (1998), S. 20ff.

<sup>86</sup> Vgl. Teich (1998), S. 90ff.

Dennoch sind bestimmte Zielkriterien auf das vorliegende Problem übertragbar. So sind die kapazitätsorientierten Ziele wie die Optimierung der Leerzeiten und Kapazitätsauslastungen auch für die Auftragszuordnung in Fließproduktionssystemen maßgebend. Gleichwohl können trotz der ähnlichen Aufgabenstellung keine Verfahren aus der Maschinenbelegungsplanung übernommen werden, da bisher noch nicht Belastungssituationen an mehreren Stationen, wie sie in einer Fließproduktionslinie vorliegen, berücksichtigt wurden.

### 3.2.2 Ansätze der Clusteranalyse

Bei der Aufteilung von Produktionsaufträgen auf parallele Fließproduktionslinien muss eine große Anzahl von Produktionsaufträgen bezüglich ihrer Eigenschaften analysiert werden, anhand derer die Zuordnung vorgenommen werden kann. Dabei spielen die Ähnlichkeiten und Unterschiede der Aufträge eine wichtige Rolle, anhand derer Aufträge zusammengefasst und bestimmten Teilsystemen zugeordnet werden sollen.

In der Wissenschaft existiert ein ähnliches Problem, dass sich mit der Einteilung von Elementen in Gruppen beschäftigt. Beim so genannten Clusteringproblem werden Objekte aufgrund von Beobachtungen in verschiedene Klassen (Cluster) eingeteilt. Dabei sollen die Objekte so eingeteilt werden, dass

- Homogenität innerhalb der Cluster vorliegt, d.h. die Elemente eines Clusters sollen möglichst „ähnlich“ zueinander sein
- Heterogenität zwischen den Clustern vorliegt, d.h. die Elemente zweier verschiedener Cluster sollen sich möglichst stark unterscheiden<sup>88</sup>

Im Gegensatz zur Klassifizierung, die sich mit der Zuordnung von Objekten zu vorgegebenen Klassen beschäftigt, ist beim Clustering die wahre Klassenzugehörigkeit der Objekte nicht bekannt. Es gibt keine vorbestimmten Klassen, denen die Objekte zuzuordnen sind.<sup>89</sup> Vielmehr sollen durch das Clustering Strukturen erst ermittelt werden.<sup>90</sup>

Als multivariates Verfahren ist die Clusteranalyse geeignet, Objekte mit einer Vielzahl von Merkmalen zu vergleichen. Dies geschieht mit Hilfe eines Distanzmaßes, das die Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit zweier Objekte beschreibt.<sup>91</sup> Distanzmaße lassen sich nach der Art der zu vergleichenden Attribute in binäre und metrische Maße unterscheiden.

Bei binären Attributen muss für jedes Attribut überprüft werden, ob eine Übereinstimmung vorliegt oder nicht. Je nach Distanzmaß wird dann die Anzahl der Übereinstimmungen in unterschiedlicher Form zur Gesamtzahl der Attribute in Beziehung gesetzt. Bekannte Distanzmaße sind:<sup>92</sup>

---

<sup>87</sup> Vgl. Trautmann (2001), S. 12ff.

<sup>88</sup> Vgl. u.a. Steinhausen; Langer (1977), S. 14ff.; Kaufmann (1996), S. 437ff.; Backhaus et al. (2006), S. 489ff.

<sup>89</sup> Vgl. Henrion; Henrion (1995), S. 44ff.

<sup>90</sup> Vgl. Steinhausen; Langer (1977), S. 14.

<sup>91</sup> Vgl. Kaufmann, S. 440ff.

<sup>92</sup> Vgl. Steinhausen; Langer (1977), 53ff.; Kaufmann (1996), S. 443ff.

- Euklidische Distanz
- Quadratische Euklidische Distanz
- (Simple)-Matching-Koeffizient
- Jaccard-Koeffizient
- Russel-and-Rao-Koeffizient
- Dice-Koeffizient

Auch für den Vergleich metrischer Attribute existiert eine Reihe von Distanzmaßen, die sich vor allem dadurch unterscheiden, wie stark Ausreißer berücksichtigt werden. Zu den bekanntesten Distanzmaßen gehören hier.<sup>93</sup>

- Euklidische Distanz
- Manhattan-Metrik
- Minkowski-Distanz
- Quadrierter Euklidischer Abstand

Mit Hilfe der Distanzmaße kann die Einteilung der Objekte in Cluster vorgenommen werden. Zur Lösung des Clusteringproblems existieren verschiedene Verfahren, die im Folgenden beschrieben werden.

### 3.2.2.1 Hierarchische Verfahren

Hierarchische Clustering-Verfahren erzeugen aus einer Objektmenge eine ineinander verschachtelte, hierarchische Struktur von Clustern, die meist in Form einer Baumstruktur als so genanntes Dendrogramm dargestellt wird. In der untersten Strukturebene enthält jeder Cluster ein Objekt, in der obersten sind alle Objekte zu einem Cluster aggregiert. Dabei sind zwei Cluster auf unterschiedlicher Strukturebene entweder elementfremd oder einer der Cluster ist in dem anderen enthalten.<sup>94</sup>

Das hierarchische Clustering kann in zwei Arten von Verfahren unterteilt werden. Geht man davon aus, dass zu Beginn jedes Element einen Cluster bildet und diese Cluster Schritt für Schritt zu größeren Clustern aggregiert werden, bis schließlich alle Objekte in einem Cluster enthalten sind, dann spricht man von agglomerativen Verfahren. Geht man vom umgekehrten Fall aus, dass zu Beginn ein großer Cluster mit allen Objekten vorhanden ist und dieses Schritt für Schritt in mehrere, kleinere Cluster zerlegt wird, bis schließlich jedes Objekt einen Cluster bildet, dann spricht man von divisiven Verfahren.<sup>95</sup>

Agglomerative Verfahren gehen von einer Menge von ein-elementigen Clustern aus, jedes Objekt wird also auch hier wieder als ein eigener Cluster angesehen. Nun versucht das Verfahren diese Cluster zu größeren Clustern zu verschmelzen. Dazu wird zwischen jedem Clusterpaar die

---

<sup>93</sup> Vgl. Steinhausen; Langer (1977), 58ff.; Kaufmann (1996), S. 443ff.

<sup>94</sup> Vgl. Steinhausen; Langer (1977), S. 73f.; Henrion; Henrion (1995), S. 45f.

<sup>95</sup> Vgl. Kaufmann (1996), S. 453ff.; Backhaus et al. (2006), S. 514ff.

Distanz berechnet und in einer Distanzmatrix gespeichert. Die Cluster mit der minimalen Distanz werden zu einem Cluster vereint. Dieser Schritt wird so lange wiederholt, bis alle Objekte in einem Cluster zusammengefasst sind.

Divisive Verfahren starten mit einem großen Gesamtcluster, welches alle Objekte enthält. Dieses wird dann Schritt für Schritt aufgeteilt, indem die jeweils unähnlichsten Objektgruppen voneinander getrennt werden. Die Aufteilung lässt sich soweit fortführen, bis jedes Objekt für sich einen Cluster bildet. Divisive Verfahren sind rechenaufwändiger und weniger verbreitet als agglomerative Verfahren, können aber vorteilhaft sein, wenn eine sehr geringe Clusteranzahl erwartet wird.

Zur Berechnung der Distanzen zwischen den Clustern gibt es eine Reihe von Verfahren. Zu den bekanntesten gehören beispielsweise das Single Linkage-, das Complete Linkage-, das Average Linkage-, das Centroid- und das Ward-Verfahren. Die Auswahl des Verfahrens spielt für die Reaktion auf Ausreißer und die Größe der Cluster eine Rolle.

Als Vorteil von hierarchischen Verfahren wird gesehen, dass aus den Verbindungen zwischen den Clustern die Ähnlichkeitsstruktur abgelesen werden kann.<sup>96</sup> Ein großer Nachteil der hierarchischen Verfahren ist, dass eine einmal getroffene Entscheidung für die Division eines Clusters oder die Verschmelzung zweier Cluster im Nachhinein nicht mehr rückgängig gemacht werden kann.<sup>97</sup> Auch werden hierarchische Verfahren als sehr anspruchsvoll in Bezug auf ihre Speicherplatzanforderungen und ihre Laufzeit beschrieben.<sup>98</sup>

### 3.2.2.2 Partitionierende Verfahren

Im Gegensatz zu den hierarchischen Verfahren bilden partitionierende Verfahren keine ineinander verschachtelte Clusterstruktur in Form eines Baumes, sondern teilen die Objekte in eine gegebene Anzahl von Clustern ein. Die partitionierenden Verfahren gehen von einer zufälligen Anfangspartitionierung aus und ordnen die Objekte schrittweise zwischen den Clustern um, sodass sich die Güte der Zuordnung iterativ verbessert. Dazu wird bei jeder Iteration für jeden Cluster ein Mittelwert oder Repräsentant bestimmt. Die Objekte werden dann dem Cluster zugeordnet, dessen Zentrum oder Repräsentanten sie am ähnlichsten sind. Das Verfahren endet, wenn sich die Güte der Lösung nicht weiter verbessert.

Ein wegen seiner Einfachheit und auch geringer Laufzeit oft eingesetzter Algorithmus, der zu den partitionierenden Verfahren gehört, ist der  $k$ -means-Algorithmus. Der Algorithmus geht so vor, dass zunächst  $k$  Clusterzentren zufällig ausgewählt werden. Anschließend wird jedes Objekt dem ihm am nächsten liegenden Cluster zugeordnet. Anhand dieser Zuordnung werden dann neue Clusterzentren berechnet, die als Ausgangspunkt für die nächste Zuordnungsiteration dienen<sup>99</sup>. Der allgemeine Ablauf des Algorithmus ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

---

<sup>96</sup> Vgl. Pruscha (2006), S. 296.

<sup>97</sup> Vgl. Steinhausen; Langer (1977), S. 74.

<sup>98</sup> Vgl. Tan et al. (2006), S. 526.

<sup>99</sup> Vgl. Tan et al. (2006), S. 497ff.

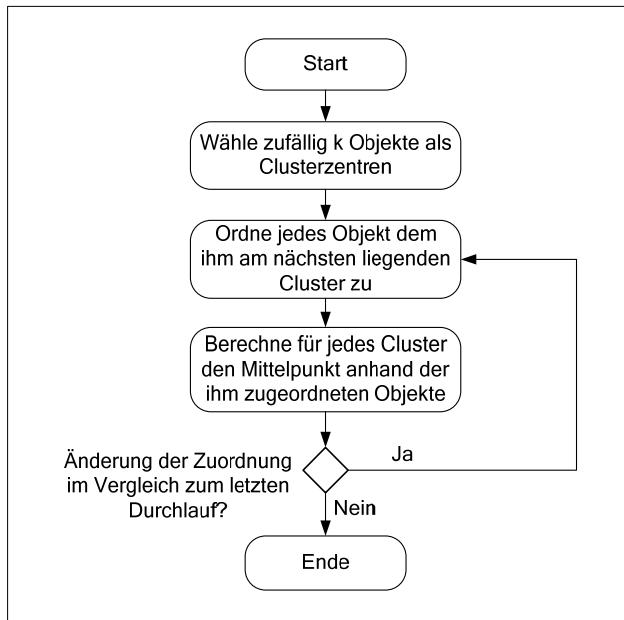


Abbildung 3.1: Ablaufdiagramm des  $k$ -means-Algorithmus

Zu den Nachteilen dieses Verfahrens zählen die starke Abhängigkeit des Ergebnisses von der Wahl der zufälligen Clusterzentren und die Anforderung, dass die Anzahl der zu erzeugenden Cluster im Vorhinein bestimmt werden muss. Durch die Vorgehensweise kommt es oft nur zu lokalen Optima bei der Clusterzuordnung. Eine Lösung wird dann als lokales Optimum bezeichnet, wenn durch den Austausch zweier Elemente keine Verbesserung der Zielfunktion erreicht werden kann.<sup>100</sup> Diesem Effekt kann entgegengewirkt werden, indem der Algorithmus mehrere Male hintereinander ausgeführt wird und anschließend die Ergebnisse aller Ausführungen verglichen werden. Auch durch die gezielte Bestimmung der Clusterzentren kann eine Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden. Die Vorteile des Verfahrens sind insbesondere die Einfachheit und die Laufzeit des Algorithmus<sup>101</sup>, sowie die Möglichkeit ein zugeordnetes Objekt nach Verschieben der Clusterschwerpunkte neu zuzuordnen.<sup>102</sup>

Eine Abwandlung des  $k$ -means-Algorithmus ist der EM (Expectation Maximization)-Algorithmus, der den Objekten Wahrscheinlichkeiten für die Clusterzugehörigkeit zuordnet. Dadurch wird eine „weiche“ Clusterzuordnung erreicht. Ein ähnlicher Ansatz ist das Fuzzy-Clustering, bei dem die Objekte unscharf auf die Cluster verteilt werden. Des Weiteren existieren graphentheoretische Ansätze, die auf Daten angewendet werden können, die als Graphen darstellbar sind. Diese versuchen eine Partitionierung des Graphen zu finden, die ein Clustering der Objekte darstellen.

### 3.2.2.3 Exakte Verfahren

Das Zuordnungsproblem lässt sich als mathematisches Programm formulieren, wobei die Minimierung der Gesamtdistanz als Zielfunktion verwendet wird. Dieses mathematische Prog-

<sup>100</sup> Vgl. Steinhausen; Langer (1977), S. 100ff.

<sup>101</sup> Vgl. Tan et al. (2006), S. 510.

<sup>102</sup> Vgl. Pruscha (2006), S. 296; Backhaus et al. (2006), S. 514.

ramm lässt sich durch exakte Verfahren lösen. Zu diesen Verfahren gehören das Branch&Bound-Verfahren und die dynamische Programmierung.

Ein Branch&Bound-Verfahren zur Lösung des Clustering-Problems wird von *Iyer und Aronson* vorgestellt.<sup>103</sup> Durch Wiederverwendung von bereits berechneten Teillösungen kann der Lösungsraum erheblich reduziert werden. Zusätzlich wird durch einen Parallelisierungsansatz erreicht, dass eine gleichzeitige Nutzung von mehreren Prozessoren ermöglicht wird. Die Rechenzeit für ein Problem mit 23 Elementen und 7 Clustern, das exakt gelöst wurde, lag jedoch selbst bei vier parallelen Prozessoren bei über 50 Minuten.

Ein Verfahren der dynamischen Programmierung präsentiert *Jensen*.<sup>104</sup> Auch hier werden Teillösungen für die Berechnung der Lösung wieder verwendet. Durch die Nutzung bereits optimierter Teillösungen kann das Hauptproblem durch eine geschickte Aufgliederung schneller gelöst werden. Zusätzlich werden redundante Lösungen, die nur Permutationen einer anderen Lösung darstellen, nur einmal bewertet. Durch diese beiden Ansätze kann die Anzahl der Berechnungsschritte gegenüber der expliziten Berechnung erheblich reduziert werden. Dennoch sind auch hier bereits bei kleinen Problemgrößen sehr lange Rechenzeiten zu erwarten.

Neben diesen Verfahren können noch weitere Ansätze genutzt werden, um das Clusteringproblem exakt zu lösen. Hierzu gehören die Lagrange-Relaxation und das Spaltengenerierungsverfahren nach *Dantzig/Wolfe*<sup>105</sup>. Auch hier wird das Hauptproblem in leichter zu lösende Unterprobleme geteilt. Durch Berechnung von heuristischen Lösungen während der Laufzeit werden obere Schranken für die Lösung berechnet, durch die die Güte der aktuell gefundenen besten Lösung bewertet werden kann. Allerdings ist zu beachten, dass diese Verfahren für praxisrelevante Problemgrößen sehr lange brauchen, bis Ober- und Untergrenze nahe genug zusammen liegen. Für Beispiele zur Anwendung von Lagrange-Relaxation und Spaltengenerierungsverfahren auf das Clusteringproblem sei hier auf die Arbeiten von *Mulvey und Crowder* sowie *Savelsbergh* verwiesen.<sup>106</sup>

### 3.2.2.4 Genetische Algorithmen

Eine weitere Klasse von Verfahren, die zur heuristischen Lösung von Clusteringproblemen eingesetzt wird, sind Genetische Algorithmen.<sup>107</sup> Bei Genetischen Algorithmen handelt es sich um einen so genannten metaheuristischen Ansatz. Das bedeutet, dass es als Lösungsverfahren unabhängig vom zugrunde liegenden Problem eingesetzt werden kann. Da später bei der Untersuchung von geeigneten Verfahren zur Lösung der in Kapitel 2.2.3 vorgestellten Problematik genauer auf die Prinzipien der Genetischen Algorithmen eingegangen wird, sei hier auf den Abschnitt 3.3 verwiesen.

---

<sup>103</sup> Iyer; Aronson (1999).

<sup>104</sup> Jensen (1969).

<sup>105</sup> Vgl. Dantzig; Wolfe (1960).

<sup>106</sup> Mulvey; Crowder (1979); Savelsbergh (1997).

<sup>107</sup> Beispiele für den Einsatz von Genetischen Algorithmen für Clusteringprobleme finden sich bei Cowgill et al. (1999); Chiou; Lan (2001); Nöth (2004).

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen exakten Verfahren arbeiten Genetische Algorithmen mit Zufallswerten. Das heißt, dass abhängig von den Werten, die während der Laufzeit generiert werden, unterschiedliche Lösungen generiert werden können. Dagegen zeichnen sich genetische Algorithmen gegenüber exakten Verfahren durch sehr gute Lösungszeiten aus. Die erreichbare Lösungsqualität ist dabei im Vergleich zu den hierarchischen und partitionierenden Verfahren höher einzuschätzen. Einschränkend ist zu sehen, dass für das hier untersuchte Problem, bei dem auch ungültige Zuordnungen aufgrund der eingeschränkten Baubarkeit bestehen können, dafür gesorgt werden muss, dass nur Lösungen mit gültigen Zuordnungen bestimmt werden.

### **3.3 Stand der Technik zur Anpassungsplanung von verteilten Fließproduktionssystemstrukturen unter Unsicherheit**

Aus den Anforderungen an ein Verfahren zur Strukturplanung eines verteilten Fließproduktionssystems unter Unsicherheit leitet sich die Notwendigkeit ab, Entscheidungen über das Produktionsprogramm und die Transportmengen zu integrieren. Hierzu sind mathematische Modelle geeignet, in denen durch angepasste Nebenbedingungen und Zielfunktionsbestandteile alle relevanten Entscheidungen und deren Kostenauswirkungen formuliert werden können. Darüber hinaus bieten mathematische Modelle auch die Möglichkeit, die geforderte Stochastik der Eingangsparameter abzubilden.

Bei der Formulierung mathematischer Modelle ist darauf zu achten, dass ein ausreichender Detallierungsgrad verwendet wird und alle notwendigen Restriktionen aufgenommen werden. Dadurch kann es jedoch dazu kommen, dass die Problemkomplexität soweit ansteigt, dass die Lösbarkeit durch Standardverfahren der mathematischen Optimierung nicht mehr gegeben ist. Bei komplexen Problemen ist daher auch der Einsatz von Heuristiken zu untersuchen. Aufgrund der Eignung für kombinatorische Probleme und der Möglichkeit zur Hybridisierung mit klassischen linearen Lösungsalgorithmen erscheinen Genetische Algorithmen für das hier beschriebene Problem als besonders geeignet.

Da die Planung unter Unsicherheit der Nachfrage getroffen werden soll, wird in einem ersten Abschnitt der Stand der Technik zur Darstellung einer unsicheren Nachfrage in Form von Szenarien wiedergegeben. Anschließend werden Vorgehensweisen für die Anpassungsplanung für Montagesysteme vorgestellt. Aufgrund der Nähe des beschriebenen Problems zu Netzwerkwerkplanungsproblemen wird auch ein Überblick über Arbeiten auf diesem Gebiet gegeben, die mathematische Modelle verwenden. Abschließend werden die Grundlagen zur Hybridisierung von zweistufigen mathematischen Problemen dargestellt, wobei speziell auf Genetische Algorithmen eingegangen wird.

#### **3.3.1 Entwicklung von Nachfrageszenarien**

Voraussetzung für die Planung unter Unsicherheit sind Szenarien, die die zukünftige Entwicklung des Marktes wiedergeben. Diese sind notwendige Grundlage für die quantitativen Entscheidungen bei der Planung der Produktionskapazitäten und sollten daher möglichst genau sein.

Methoden, die eine langfristige Vorhersage unterstützen, basieren dabei meist auf Annahmen über die Zukunft, die nur qualitativen Charakter haben. Die Abfrage der zugrunde liegenden Einschätzungen kann zwar durch verschiedene Methoden<sup>108</sup> unterstützt werden. Dieses Vorgehen kann aber auch zu in sich widersprüchlichen Aussagen führen. Diesem Umstand kann beispielsweise durch die Szenario-Technik Rechnung getragen werden, durch die mehrere in sich konsistente Szenarien parallel entwickelt werden.<sup>109</sup> In jedem Fall ist es notwendig, dass die qualitativen Szenarien in Nachfrageszenarien umgesetzt werden, die als Grundlage für die Produktionsplanung dienen können. Darüber hinaus existieren auch analytische Verfahren, die direkt versuchen, quantitative Zusammenhänge und Daten zu liefern. Hierzu gehören beispielsweise Zeitreihenanalysen oder ökonometrische Modelle. Die Schwäche dieser Verfahren ist, dass sie alle auf der Annahme basieren, dass sich vorhandene Trends oder Verhaltensweisen fortsetzen würden und daher für längere Zeiträume nur bedingt anwendbar sind.<sup>110</sup>

Ein pragmatischer und für die Produktionsplanung sinnvoller Ansatz ist es, mehrere Szenarien für unterschiedliche Stärken des Wirtschaftswachstums heranzuziehen.<sup>111</sup> Aufgrund der Unwissheit über in der Zukunft liegende Ereignisse kann sich die Planung in den seltensten Fällen auf nur ein Szenario stützen, dennoch können anhand von Abschätzungen über die zukünftige Entwicklung meist Aussagen darüber getroffen werden, in welchem Korridor sich die Nachfrage entwickeln wird. Für ein Produktionssystem kann dann untersucht werden, wie es sich bei verschiedenen Szenarien verhält.<sup>112</sup>

Die Entwicklung von Nachfrageszenarien ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit und wird hier als gegeben angenommen, so dass auf die oben genannten Quellen verwiesen wird.

### 3.3.2 Anpassungsplanung von Montagesystemen

In Arbeiten zur Montagesystemplanung wird die Anpassung an die wechselnde Nachfrage meist in Form diskreter Ausbaustufen beschrieben.

#### 3.3.2.1 Lotter et. al

Ein Ansatz für die Anpassungsplanung von Montagesystemen wird von *Lotter et. al.* beschrieben.<sup>113</sup> Die Kapazität des Montagesystems soll mit Hilfe des vorgestellten Verfahrens an einen ansteigenden Absatzverlauf angepasst werden. Die Ausbaustufen werden dabei durch eine Aufteilung der Arbeitsinhalte auf parallele Arbeitsstationen und einen ansteigenden Automatisierungsgrad beschrieben. Die Bestimmung der Stufenabfolge erfolgt dann über die periodenweise Berechnung der eingesparten ausgabewirksamen Kosten.

---

<sup>108</sup> Vgl. dazu Coyle (1997), S. 86ff.

<sup>109</sup> Vgl. Gausemeier et al. (1996).

<sup>110</sup> Vgl. Coyle (1997), S. 84f.

<sup>111</sup> Vgl. Coyle (1997), S. 88.

<sup>112</sup> Vgl. Hernández Morales (2003).

<sup>113</sup> Vgl. Lotter et al. (1998), S. 155ff.

### 3.3.2.2 Feldmann et al.

Ein weiteres Verfahren, das zur Anpassung eines Montagesystems an steigende Stückzahlen verwendet wird, findet sich bei *Feldmann et. al.*<sup>114</sup> Die Anpassung erfolgt stufenweise an die vom Markt vorgegebene Nachfrage, wobei sowohl organisatorische Maßnahmen als auch technische Erweiterungen verwendet werden. Die technischen Ressourcen werden dabei in Form eines Baukastens dargestellt, der die flexible Kombination der Elemente zu unterschiedlichen Automatisierungsgraden ermöglicht.

### 3.3.2.3 Krüger

Ähnlich geht *Krüger* vor, der eine Systematisierung der Anpassungsoptionen für Montagesysteme in Form von Strategiebausteinen vornimmt.<sup>115</sup> Die Planung und Auswahl der Strategiebausteine erfolgt getrennt für die Anpassung an kurz-, mittel- und langfristige Stückzahländerungen. Die Bewertung alternativer Anpassungsstrategien wird hierbei mit Hilfe einer erweiterten Wirtschaftlichkeitsrechnung nach *Bullinger* durchgeführt.<sup>116</sup>

### 3.3.2.4 Schuh et al.

Auch *Schuh et al.* verwenden in ihrem Verfahren modulare Produktionsressourcen zur Anpassung an die wechselnde Nachfrage.<sup>117</sup> Durch die Verwendung von Produktionsmodulen kann sowohl auf veränderte Produktionsmengen als auch auf veränderte Produkte reagiert werden. Mit Hilfe einer so genannten Produktionsstrukturmatrix wird untersucht, welchen Einfluss bestimmte äußere Veränderungen auf das Produktionssystem haben. Anschließend wird durch die manuelle Auswahl geeigneter Strukturelemente versucht, auf diese Einflüsse zu reagieren. Die Bewertung der so erstellten Strukturalternativen erfolgt anschließend anhand einer Investitionskostenanalyse.

## 3.3 Anpassungsplanung in der Netzwerkplanung

Eine Einschränkung der Arbeiten, die sich konkret mit der Anpassung von Montagesystemen beschäftigen, ist die Tatsache, dass sie sich nur mit der Erweiterung eines einzelnen Montagesystems beschäftigen. Im Fall von großen getakteten Montagelinien sind diese Erweiterungen nur mit erheblichen Einschränkungen möglich, so dass typischerweise die Einrichtung zusätzlicher Linien zu untersuchen ist. Stehen die Linien an unterschiedlichen Standorten, sind gleichzeitig auch Entscheidungen bezüglich des Produktionsprogramms sowie der Transporte zu treffen, so dass hier auch Verfahren der Netzwerkplanung untersucht werden sollten.

---

<sup>114</sup> Feldmann et al. (2004).

<sup>115</sup> Krüger (2004).

<sup>116</sup> Vgl. Bullinger (1995), S. 137ff.

<sup>117</sup> Schuh et al. (2004).

### 3.3.3.1 Zäpfel

*Zäpfel* stellt ein mathematisches Modell zur simultanen Programm-, Kapazitätsdimensionierung- und Fertigungstiefenplanung in Produktionssystemen vor.<sup>118</sup> In dem Modell können Kapazitäten nach Bedarf eingerichtet oder abgebaut werden und Entscheidungen zum Produktionsprogramm getroffen werden. Aufgrund der fehlenden Transportkosten können jedoch keine verteilten Produktionssysteme modelliert werden. Die Bestimmung der einzelnen Entscheidungen erfolgt anhand einer Minimierung aller relevanten Ein- und Ausgaben über den Lebenszyklus der Anlage. Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten schlägt *Zäpfel* vor, die Berechnungen für unterschiedliche Szenarien durchzuführen.

### 3.3.3.2 Ferber

Ein anwendungsorientiertes Verfahren zur strategischen Netzwerkplanung von Aufbauwerken in der Automobilindustrie wird von *Ferber* vorgestellt.<sup>119</sup> Das Planungsmodell wird zur Kapazitätsauslegung von Produktionslinien in den Gewerken der Automobilproduktion genutzt. Hierbei werden sowohl entstehende Investitionskosten als auch variable Kosten für Beschaffung, Produktion und Distribution berücksichtigt. Bei dem Modell handelt es sich um ein deterministisches gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell. In dem Planungsansatz wird davon ausgegangen, dass eine sichere Nachfrage vorliegt, die vollständig zu erfüllen ist.

### 3.3.3.3 Tonigold

Ein Verfahren, dass sich mit der Anpassungsplanung von mehrstufigen Fließproduktionslinien in der Zerspanung beschäftigt, findet sich bei *Tonigold*.<sup>120</sup> In dem Optimierungsmodell können Transportkosten zwischen einzelnen Linien sowie zu den Märkten abgebildet werden. Die Anpassungsoptionen werden hierbei in Form von diskreten Systemzuständen abgebildet, für die die entscheidungsrelevanten Kosten hinterlegt sind und auf den Planungszeitpunkt abgezinst werden. Die Unsicherheit der Nachfrage wird in dem Verfahren über die Berechnung optimaler Anpassungspfade für eine Schar von Szenarien berücksichtigt. Die Bewertung unterschiedlicher Anlagenkonzepte erfolgt dann über den Vergleich der sich ergebenden Kapitalwerte, die mit den einzelnen Szenarienwahrscheinlichkeiten gewichtet werden.

### 3.3.3.4 Bundschuh

*Bundschuh* entwickelt in seiner Arbeit ein flexibles Verfahren zur Planung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie.<sup>121</sup> Durch modulare zusammenstellbare Nebenbedingungen kann das Optimierungsmodell problemspezifisch für verschiedene Detaillierungsgrade der Planung angepasst werden. Je nach Auswahl der Nebenbedingungen kann das Modell von der Standortplanung bis zur Prozessplanung angewendet werden. Einschränkend ist jedoch zu sehen, dass die Modellkomplexität mit zunehmendem Detaillierungsgrad immer weiter ansteigt,

---

<sup>118</sup> *Zäpfel* (1989).

<sup>119</sup> *Ferber* (2005).

<sup>120</sup> *Tonigold* (2007).

<sup>121</sup> *Bundschuh* (2008).

so dass hier nur Probleme mit geringer Variablenanzahl gelöst werden können. Die Unsicherheit von Stückzahlprognosen wird in den Modellen nicht berücksichtigt.

### 3.3.4 Zweistufige stochastische Verfahren

Als Lösungsansatz soll für das beschriebene Problem ein mathematisches Optimierungsmodell formuliert werden. Hierbei kann die Entscheidungssituation über Zielfunktion, Entscheidungsvariablen und Nebenbedingungen abgebildet werden, für deren Lösung anschließend geeignete Verfahren entwickelt werden können. Für das hier gegebene Problem bietet sich innerhalb der Operations-Research-Methoden die gemischt-ganzzahlige stochastische Optimierung an.<sup>122</sup> Aufgrund der Anforderung, innerhalb des Modells Nachfrageunsicherheiten abzubilden, kann hier eine spezielle Formulierung der stochastischen Programmierung angewendet werden, die so genannte zweistufig-stochastische Programmierung (siehe Abbildung 3.2).

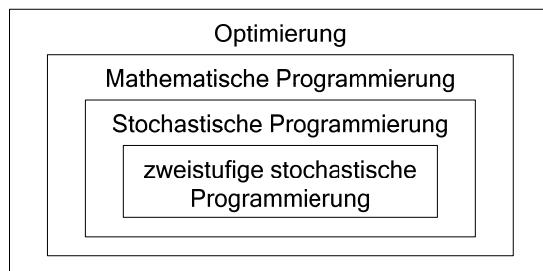


Abbildung 3.2: Einordnung der zweistufigen stochastischen Optimierung

Stochastische Optimierungsmodelle sind dadurch gekennzeichnet, dass sie ein oder mehrere Eingangsparameter enthalten, deren Werte nicht exakt bekannt sind. Anstelle eines einzigen deterministischen Wertes gibt es bei Unsicherheit über die Modellparameter mehrwertige Informationen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass mehrere zukünftige Zustände in Form von Szenarien mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten auftreten können.<sup>123</sup>

In der stochastischen Optimierung wird daher nicht von deterministischen Modellparametern z.B. bei der Produktnachfrage ausgegangen. Dies führt zu einer realistischeren Betrachtungsweise, da solche Größen meist nicht vollständig bekannt sind. Folglich werden hier die variierenden Parameter als Zufallsvariablen mit bekannten Verteilungen direkt im Modell abgebildet.<sup>124</sup> Eine bestimmte Realisation von Zufallsparametern wird dabei als Szenario bezeichnet. Dabei kann eine endliche Anzahl von Szenarien erzeugt werden, von denen jedes Szenario mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit belegt wird. Wie in der Wahrscheinlichkeitstheorie üblich, muss die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien dabei 1 ergeben.<sup>125</sup>

<sup>122</sup> Vgl. Suhl; Mellouli (2006), S.22.

<sup>123</sup> Auf eine grundlegende Einführung zur stochastischen Programmierung sei auf Kall; Wallace (1994) verwiesen.

<sup>124</sup> Vgl. Birge; Louveaux (1997), S. 49ff.

<sup>125</sup> Sei  $\Omega$  die Anzahl der Szenarien und  $\pi$  die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios, dann gilt

$$\sum_{\omega=1}^{\Omega} \pi_{\omega} = 1$$

Die zweistufige stochastische Formulierung des Modells ermöglicht es, dass bestimmte Entscheidungen so abgebildet werden können, dass sie nach Realisation der Nachfrage angepasst werden können. Somit ergibt sich eine Aufteilung der zu treffenden Entscheidungen in zwei Stufen (siehe Abbildung 3.3):

- Entscheidungen der ersten Stufe sind nicht änderbare Entscheidungen. Diese können auch als „Hier und Jetzt“-Entscheidungen bezeichnet werden. Im Fall der Strukturplanung fallen hierunter die Entscheidungen über die Installation von technischen Kapazitäten.
- Entscheidungen der zweiten Stufen bauen auf den Entscheidungen der ersten Stufe auf und können revidiert werden. Diese werden auch als Korrekturentscheidungen bezeichnet. Hierzu gehören Programm- und Transportentscheidungen während der Nutzung des Produktionssystems.

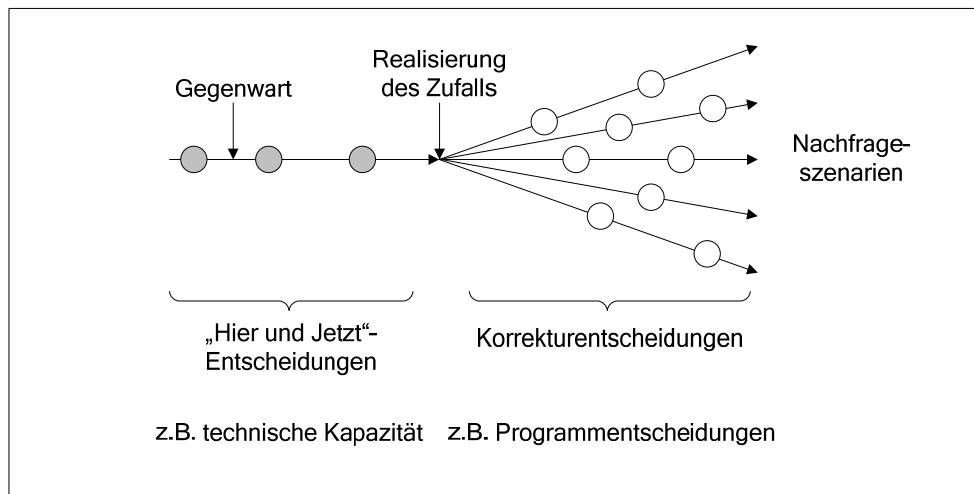


Abbildung 3.3: Treffen von Entscheidungen unter Unsicherheit

Die Betrachtung von Zufallsvariablen erschwert die stochastische Modellierung und führt im Allgemeinen dazu, dass für ein komplexes stochastisches Programm mit vielen Variablen und Nebenbedingungen eine optimale Lösung schwierig zu finden ist. Da ein deterministisches Modell dagegen eine optimale Lösung besitzt, wird im Hinblick auf eine gute Entscheidungsfindung zu jedem stochastischen Modell ein äquivalentes deterministisches Modell formuliert, ein sog. deterministisches Äquivalent. Dabei berücksichtigt die deterministische Ersatzzielfunktion die Unsicherheit nur noch über Erwartungswerte. Ein entsprechendes Modell, in dem die Unsicherheit mit Hilfe endlich vieler Szenarien  $s \in \Omega$  und deren Wahrscheinlichkeiten  $\pi_s$  repräsentiert wird, kann somit als gemischt-ganzzahliges lineares Programm formuliert werden:

$$\text{Minimiere} \quad c^T + \sum_{s=1}^{\Omega} \pi_s q_s^T y_s \quad \text{Gl. 3.3-1}$$

$$\text{s.t.} \quad T_s x + W_s y_s \leq h_s \quad \text{Gl. 3.3-2}$$

$$x \in X, y_s \in Y, s = 1, \dots, \Omega \quad \text{Gl. 3.3-3}$$

$X$  repräsentiert dabei die Menge der Entscheidungsvariablen der ersten Stufe und  $Y$  die Variablen der zweiten Stufe.

Im Folgenden sollen Verfahren, die zweistufig stochastische Verfahren in der Netzwerkplanung anwenden und auf die Strukturplanung übertragbar sind, vorgestellt werden.

### 3.3.4.1 Laengle et al.

Ein prinzipieller Ansatz zur Bewertung von Produktionsanlagen über den Lebenszyklus bei schwankender Nachfrage findet sich bei *Laengle et al.*, der die optimale Produktionskapazität und Flexibilität eines Produktionssystems durch die Berechnung der Kapitalwerte aller Einnahmen und Ausgaben im Laufe des Anlagenlebenszyklus für verschiedene Auslegungszustände bestimmt.<sup>126</sup> Die Anpassung der Kapazität im Zeitverlauf erfolgt dabei in Stufen, denen unterschiedliche Kosten für Installation, Betrieb und Erhaltung zugeordnet werden. Die Besonderheit des vorgestellten Ansatzes ist, dass hier ein mehrstufiges stochastisches dynamisches Programm verwendet wird. Das Verfahren wird anschließend in einem sehr einfachen Beispiel mit zwei Produkten für den Vergleich von unterschiedlichen Flexibilitätsstrategien anhand der Kapitalwerte verwendet.

### 3.3.4.2 Santoso et al.

Ein Modell, das auf die Planung von mehrstufigen Produktionssystemen übertragen werden kann, wird von *Santoso et al.* entwickelt.<sup>127</sup> Bei dem Modell handelt es sich um ein zweistufig-stochastisches Modell. Auf der ersten Stufe werden Entscheidungen bezüglich der Standorte und Kapazitäten getroffen. Diese Entscheidungen werden in Form von Investitionskosten in dem Modell berücksichtigt. In der zweiten Stufe werden Entscheidungen zur Nutzung der installierten Kapazitäten unter Unsicherheit getroffen. Ziel ist die Minimierung der Gesamtsumme aus Investitionskosten und erwarteten Produktions- und Transportkosten. Als Besonderheit des Verfahrens ist das verwendete Beschleunigungsverfahren auf Basis der Sample-Average-Approximation zu nennen, durch das die Lösungsfindung auch für größere Szenarienzahlen ermöglicht wird.

### 3.3.4.3 Friese

*Friese* stellt einen Ansatz zur Flexibilitäts- und Kapazitätsplanung für Produktionsnetzwerke vor.<sup>128</sup> Hierzu wird ein zweistufiges stochastisches Modell verwendet. In der ersten Stufe werden so genannte Links gesetzt, durch die festgelegt wird, welches Produkt auf welcher Linie produziert werden kann. Die Entscheidung, welche Kapazität in der ersten Periode für die jeweilige Linie installiert wird, wird hier ebenfalls getroffen. Auf der zweiten Stufe werden technische und organisatorische Kapazitätsanpassungen sowie das Produktions- und Transportprogramm bestimmt. Um die entstehende Kombinatorik einzuschränken, wird eine Vorgehensweise vorgeschlagen, aufgrund derer eine Reduzierung der zu treffenden Entscheidungen durch Berücksichtigung produktionsstrategischer Prämissen möglich ist.

---

<sup>126</sup> Laengle et al. (1994).

<sup>127</sup> Santoso et al. (2005).

### 3.3.4.4 Bihlmaier et al.

Bihlmaier et al. beschäftigen sich in ihrer Arbeit ebenfalls mit der strategische Flexibilitäts- und Kapazitätsplanung unter Unsicherheit in Produktionsnetzwerken in der Automobilindustrie.<sup>129</sup> Auch hier wird ein zweistufiges stochastisches Modell entwickelt, das sich insbesondere durch die Antizipation der taktischen Entscheidungen zur Arbeitskräfteplanung auszeichnet. Die Arbeitskräfteplanung erfolgt in diskreten Stufen, durch die die unterschiedlichen Schichtmodelle abgebildet werden. Zur Lösung des mathematischen Modells wird das Benders-Dekompositionsverfahren implementiert. Dadurch können auch komplexe Probleme mit vielen Szenarien effizient gelöst werden.

### 3.3.5 Heuristische Verfahren zur Lösung kombinatorischer Probleme

Zweistufig-stochastische Probleme sind aufgrund ihrer Struktur sehr komplex, so dass bei realen Problemgrößen sehr hohe Lösungszeiten bei Standardlösungsverfahren auftreten. Daher ist ihre Verbreitung im Vergleich zu den nicht-stochastischen Verfahren gering. Da jedoch bereits die Eingangsdaten der Modelle einer Unsicherheit unterliegen, ist die Notwendigkeit einer exakten Lösung in Frage zu stellen. Somit bietet sich hier die Anwendung heuristischer Verfahren an, die oftmals erhebliche Lösungszeitverringerungen bei geringer Abweichung von der optimalen Lösung ermöglichen.

Die meisten heuristischen Optimierungsverfahren beginnen mit einer zufällig konstruierten Anfangslösung. Durch gezieltes Absuchen des Lösungsraumes nach weiteren Lösungen wird dann versucht, möglichst nahe an das exakte Optimum zu kommen. Die Verfahren unterscheiden sich dabei hauptsächlich durch die Strategie zur Bestimmung der Suchrichtung. Zu den am weitesten verbreiteten Verfahren gehören das Gradientenverfahren, Tabu Search, Hill Climbing, Simulated Annealing, Threshold Accepting, Sintflut-Algorithmen, Ameisenalgorithmen und Genetische Algorithmen.<sup>130</sup>

Die Tatsache, dass Genetische Algorithmen von einer Menge mehrerer Lösungen aus starten und dadurch relativ große Lösungsräume effizient durchsuchen können, begründet die Auswahl einer solchen Metaheuristik zur genaueren Untersuchung für die Lösung komplexer zweistufiger stochastischer Probleme. Beispiele für den erfolgreichen Einsatz von Genetischen Algorithmen zur Lösung derartiger Probleme finden sich in der Literatur, sie sind jedoch erst wenig verbreitet.<sup>131</sup> Insbesondere der Ansatz von *Till*, der ein Verfahren nutzt, das auf einer Stufendekomposition basiert, erscheint für eine Übertragung auf das hier vorliegende Problem geeignet.<sup>132</sup> Dabei wird die erste Stufe mit Hilfe eines Genetischen Algorithmus, die zweite Stufe durch einen MILP-Solver gelöst. Dieses Verfahren kann auch als hybrider Genetischer Algorithmus bezeichnet werden.

---

<sup>128</sup> Friese (2008).

<sup>129</sup> Bihlmaier et al. (2008).

<sup>130</sup> Siehe Gerdes et al. (2004).

<sup>131</sup> Vgl. Fischäder (2005); Till (2007); Till et al. (2006).

<sup>132</sup> Till verwendet anstelle des Begriffs Genetischer Algorithmus den Begriff Evolutionärer Algorithmus.

Bevor der angepasste hybride Genetischen Algorithmus zur Lösung des hier vorliegenden Problems beschrieben wird, soll kurz auf das Prinzip Genetischer Algorithmen eingegangen werden, um die verwendeten Begriffe einzuführen.

Der Ansatz der Genetischen Algorithmen wurde das erste Mal von *Holland* vorgestellt.<sup>133</sup> Es handelt sich um populationsbasierte Metaheuristiken, die nach dem Prinzip „Survival of the Fittest“ arbeiten. Eine Voraussetzung für den Einsatz des Verfahrens ist die Repräsentation der Problemlösung in einem Zahlenstring, der durch die Operatoren des Genetischen Algorithmus optimiert wird.

Genetische Algorithmen durchlaufen ständig einen Kreis von Schaffung einer Population, Berechnen der Fitness der Individuen, Selektion und Anwendung der genetischen Operatoren (Rekombination<sup>134</sup> und/oder Mutation). Der Ablauf ist in Abbildung 3.4 dargestellt. In einer Initialisierungsphase wird zunächst eine Startpopulation erzeugt. Dabei werden Individuen, die Elemente des Lösungsraums darstellen, nach einem Zufallsprinzip erzeugt. Die Erzeugung der Individuen der Startpopulation kann auch mittels einer Startheuristik erfolgen, dabei ist jedoch sicherzustellen, dass die Leistungsfähigkeit des Algorithmus nicht durch zu ähnliche Individuen eingeschränkt wird. Der nächste Schritt beinhaltet die Bewertung der Startpopulation, indem die Fitness der enthaltenen Individuen berechnet wird. Die Fitness beschreibt die Güte eines Individuums bezüglich eines Zielfunktionswertes. An dieser Stelle wird ein Haltekriterium gesetzt, das überprüft wird, bevor der Algorithmus weiter durchlaufen wird. Das Abbruchkriterium kann z.B. eine angegebene Laufzeit oder eine maximale Generationsanzahl sein. Im nächsten Schritt werden aus der Population Individuen ausgewählt, auf die die Mutation und/oder Rekombination angewendet wird. Das Individuum, auf das der genetische Operator angewendet wird, wird als Elter bezeichnet. Bei der Rekombination wird aus zwei zufällig ausgewählten Eltern mindestens ein Kind erzeugt. Die Mutation erzeugt stattdessen ein Kind aus nur einem Elter. Nachdem die Mutation bzw. Rekombination stattgefunden hat, werden die besten Individuen mit Hilfe des Selektionsoperators aus der aktuellen Population ausgewählt. Der Messwert bei der Selektion ist der Fitnesswert der Individuen. Die selektierten Individuen bilden die nächste Generation. So mit ist der erste Durchlauf des Algorithmus beschrieben. Ab dem zweiten Durchlauf wiederholen sich die Schritte bis das Abbruchkriterium erreicht wird und das Individuum mit dem höchsten Fitnesswert als Lösung ausgegeben wird.

---

<sup>133</sup> Holland (1975).

<sup>134</sup> In einigen Arbeiten wird gleichbedeutend mit dem Begriff der Rekombination der Begriff Crossover verwendet.

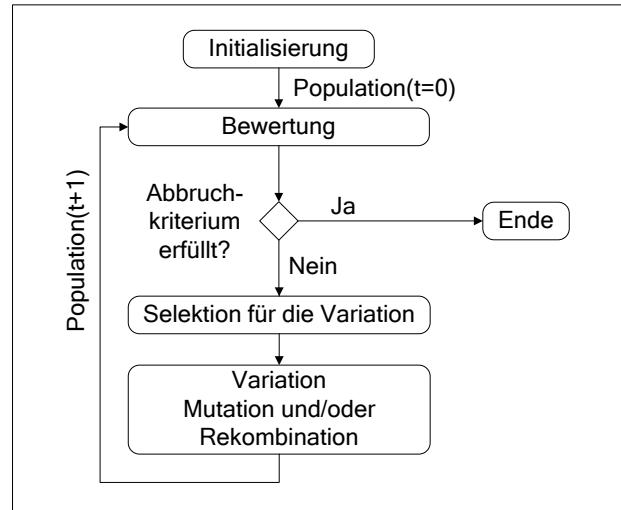


Abbildung 3.4: Genereller Ablauf eines Genetischen Algorithmus

Der hybride Genetische Algorithmus ist ein erweiterter Genetischer Algorithmus für ganzzahlige zweistufige stochastische Programmierung. Durch eine Stufendekomposition werden hierbei zwei Stufen unterschieden:

- Die erste Stufe wird als Masterproblem bezeichnet und liefert die Erststufenentscheidungen (szenariounabhängig) als Ergebnis. Die erste Stufe wird durch einen Genetischen Algorithmus gelöst.
- Die Probleme der zweiten Stufe (szenarioabhängig) werden als Subprobleme bezeichnet. Die Subprobleme sind hierbei MILP-Probleme und werden von einem Standardsolver gelöst.

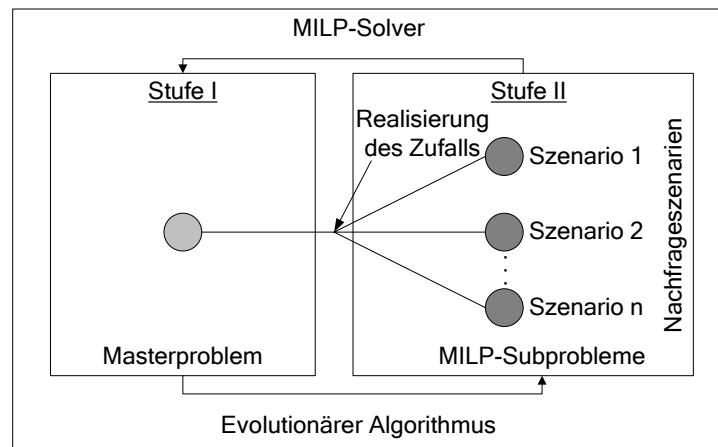


Abbildung 3.5: Stufendekomposition des hybriden Genetischen Algorithmus

Der Ablauf der Stufendekomposition kann Abbildung 3.5 entnommen werden. Das Masterproblem kann auf folgende Weise allgemein formuliert werden:

$$\text{Minimiere} \quad c^T x + Q(x) \quad \text{Gl. 3.3-4}$$

$$\text{s.t.} \quad Ax \leq b \quad \text{Gl. 3.3-5}$$

$$x \in X$$

$$\text{Gl. 3.3-6}$$

Dabei ist  $x$  eine Lösung des Masterproblems. Die Formulierung ist eine implizite Darstellung, da der szenarienabhängige Teil der Zielfunktion durch eine implizite Kompensationsfunktion

$Q(x)$  im Modell ersetzt wird. Diese Funktion ist definiert als  $Q(x) = \sum_{s=1}^{\Omega} \pi_s q_s^T y_s$  und stellt den

Erwartungswert des Zielfunktionsbeitrags der zweiten Stufe dar. Dabei ist  $y_s$  die Lösung des Subproblems Das Subproblem kann für eine gegebene Erststufenlösung  $x$  und ein Szenario  $s$  wie folgt definiert werden:

$$\text{Minimiere } Q_s(x) = q_s^T y_s \quad \text{Gl. 3.3-7}$$

$$\text{s.t. } T_s x + W_s y_s \leq h_s \quad \text{Gl. 3.3-8}$$

$$y_s \in Y \quad \text{Gl. 3.3-9}$$

$$s = 1, \dots, \Omega \quad \text{Gl. 3.3-10}$$

Der Ablauf des Algorithmus auf Stufe I unterscheidet sich nicht von dem eines allgemeinen Genetischen Algorithmus. Besonderheiten ergeben sich jedoch bei den Schritten der Fitnessberechnung und Mutation. Ein Individuum beschreibt eine Lösung der ersten Stufe, die alle Restriktionen dieser Stufe erfüllt. Um ein Individuum zu bewerten, müssen die Zielfunktionen der ersten und zweiten Stufe ermittelt werden. Dazu gibt der Genetische Algorithmus die von ihm berechnete Erststufen-Lösung  $x$  an die zweite Stufe weiter, die die MILP-Subprobleme für alle Szenarien löst. Dabei kann es dazu kommen, dass eine Unzulässigkeit des Individuums besteht. Wird jedoch eine relativ vollständige Kompensation im Modell benutzt, ist eine Unzulässigkeit auf der zweiten Stufe ausgeschlossen. Eine relativ vollständige Kompensation bedeutet, dass zu jeder Entscheidung  $x$ , die  $Ax \leq b$  erfüllt, eine gültige zulässig Lösung der zweiten Stufe existiert.<sup>135</sup> Eine andere Möglichkeit ist es, die Zielfunktion der zweiten Stufe derart zu modifizieren, dass ungültige Lösungen im Vergleich zu zulässigen Lösungen immer benachteiligt werden.<sup>136</sup>

Im allgemeinen hybriden Genetischen Algorithmus enthält ein Individuum Objekt- und Strategieparameter.<sup>137</sup> Die Objektparameter bestimmen den Zielfunktionswert des Individuums, während die Strategieparameter die Suchstrategie beeinflussen und im Laufe des Algorithmus angepasst werden können. Diese können beispielsweise verwendet werden, um die Mutationsstrategie zu beeinflussen. Zusätzlich hängt die Mutation der Objektparameter davon ab, ob die zu mutierenden Parameter reelle oder ganzzahlige Werte sind. Die reellen Objektparameter werden mutiert, indem eine durch Normalverteilung erzeugte Zufallszahl zu der Mutationsschrittweite addiert wird. Bei ganzzahligen Objektparametern dagegen wird eine durch geometrische Vertei-

<sup>135</sup> Vgl. Kall; Wallace (1994), S. 28.

<sup>136</sup> Vgl. Till (2007), S. 68.

<sup>137</sup> Vgl. Till (2007), S. 50ff.

lung erzeugte Zahl zu der Mutationsschrittweite addiert. Um die Mutation zu beenden, wird ein Abrundungsoperator verwendet, um sicherzustellen, dass sich die Objektparameter innerhalb ihrer Grenze befinden. Nach der Variation dient der Selektionsoperator dazu, aus einer Population die besten Individuen auszuwählen, wobei diese das festgelegte maximale Alter nicht überschreiten dürfen. Der Ablauf eines allgemeinen hybriden Genetischen Algorithmus ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

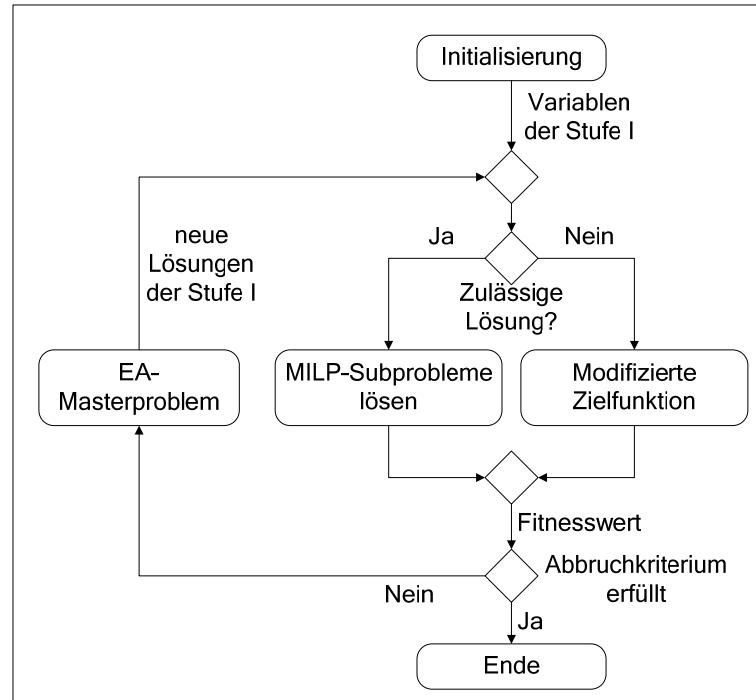


Abbildung 3.6: Ablauf des allgemeinen hybriden Algorithmus

## 4 Zu leistende Arbeiten

Bei der Analyse der Aufgabenstellung der Strukturplanung von Fließproduktionssystemen konnten drei Einzelfragen identifiziert werden. Wie bereits im Kapitel 3 werden die noch zu leistenden Aufgaben bei der Methodenentwicklung in drei getrennten Abschnitten aufgeführt. Die hier formulierten Anforderungen beziehen sich nur auf die in Kapitel 2 formulierten Einzelfragen. Diese Einzelfragestellungen werden zunächst in Kapitel 5 behandelt, während eine Einordnung der entwickelten Lösungsmethoden in eine umfassende Planungssystematik in Kapitel 6 erfolgt.

### 4.1 Verfahren zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen bei geschlossenen Stationsgrenzen

Der Überblick über die Ansätze zeigt, dass generelle Vorgehensmodelle zur Systemsstrukturierung existieren, an denen sich ein Planungsverfahren für Fließproduktionssysteme orientieren kann. Auch wenn bisher kein Verfahren existiert, das auf die Teilung des Produktionsprogramms bei der Strukturplanung von Fließproduktionslinien angewendet wird, so ist ein prinzipielles Vorgehen auf Basis von Produktähnlichkeiten grundsätzlich sinnvoll. Jedoch können diese Produktähnlichkeiten nach Zuordnung auf die Systemelemente bei geschlossenen Stationsgrenzen wie in Kapitel 2.2.1 gezeigt auch direkt bewertet werden.

Im Fall geschlossener Stationsgrenzen kann die Bewertung einer Systemteilung anhand der zu installierenden Anlagen und der für den Betrieb notwendigen Arbeitskräfte erfolgen. Da hier der Einsatz von Unterstützungsarbeitskräften ausgeschlossen ist, kann der Personalbedarf für eine gewählte Struktur ohne die Antizipation weiterer Planungsmaßnahmen während des Betriebes bestimmt werden. Die Personalkosten sind hier unabhängig vom tatsächlich auftretenden Produktmix und der produzierten Reihenfolge. Ausgehend von den in der Literatur gefundenen Bewertungsansätzen, kann zunächst ein Kostenmodell aufgestellt werden, das alle entscheidungsrelevanten Gesamtkosten eines Fließproduktionssystems mit geschlossenen Stationsgrenzen enthält. Dieses Kostenmodell kann dann durch Formulierung von Restriktionen zu einem Optimierungsmodell erweitert werden, in dem die Planungsoptionen durch Entscheidungsvariablen abgebildet werden. Bei der Formulierung des Modells sollte darauf geachtet werden, dass eine Lösbarkeit durch Standardverfahren gegeben ist. Durch die Lösung dieses Modells kann dann die kostenoptimale Strukturierung des Produktionssystems bestimmt werden.

### 4.2 Verfahren zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen

Die Bestimmung der während des Betriebs auftretenden Kosten ist bei offenen Stationsgrenzen nicht direkt möglich. Aufgrund der Möglichkeit von Stationsüberschreitungen und des Einsatzes von Unterstützungsarbeitskräften im Fall von Überlastungen müssten bereits während der Pla-

nung explizite Kenntnisse über Art und Bestellzeitpunkte der Varianten vorliegen, um über eine Simulation die genauen Personalbedarfe und -kosten antizipieren zu können.

Dennoch kann auch hier untersucht werden, welche Vorteile sich durch eine Kapazitätsteilung ergeben. Ist eine horizontale Kapazitätsteilung aufgrund von Kapazitätsbeschränkungen (z.B. durch eine technische Taktzeitbeschränkung) notwendig, können sich durch eine geeignete Aufteilung der zu bauenden Varianten auf die parallelen Linien weitere Kostenvorteile ergeben. Diese sind insbesondere in einem verringerten Einsatz von Unterstützungs- und Nacharbeitsarbeitskräften zu suchen. Dies kann erreicht werden, indem bei der Austaktung der Einzellinien eine geringere Spannbreite von Bearbeitungszeiten berücksichtigt werden muss. Somit ist ein Verfahren zu entwickeln, dass eine Verringerung dieser Bearbeitungszeitenschwankungen auf den Einzellinien minimiert.

Dieses Problem kann durch Clusteringverfahren gelöst werden, die Kundenaufträge so gruppieren, dass innerhalb der Gruppen eine geringe Varianz vorliegt. Hierzu erscheint aufgrund der Lösungsgüte und Laufzeiteigenschaften insbesondere ein partitionierendes Verfahren wie der  $k$ -means-Algorithmus geeignet, das auf das Problem angepasst werden muss.

### **4.3 Verfahren zur Planung von verteilten Fließproduktionssystemstrukturen unter Unsicherheit**

Für die Strukturplanung von verteilten Fließproduktionssystemen konnte festgestellt werden, dass die Planung die Frage zu beantworten hat, zu welchen Zeitpunkten welche Struktureinheiten mit welchen Eigenschaften bereitzustellen sind. Als wesentliche Eigenschaften sind dabei die technische Kapazität und die Flexibilität bezüglich der baubaren Varianten zu sehen. Aufgrund des relativ hohen Aufwandes zur vollständigen Umorganisation der Arbeitsvorgänge bei der Änderung der technischen Kapazität im Fall einer Anpassung der Taktzeit sind diese Fragen für einen relativ langfristigen Zeitraum zu treffen, für den nicht von vollständig bekannten Nachfrageinformationen ausgegangen werden kann.

Bei der Untersuchung des Stands der Technik zur Anpassungsplanung konnte festgestellt werden, dass die Anpassungsplanung mehrstufiger und verteilter Produktionssysteme eine integrierte Programm- und Transportplanung erfordert. Die Anpassung an die sich ändernde Nachfrage erfolgt dabei meist in diskreten Stufen, in denen unterschiedliche Kostensätze für den jeweiligen Betriebszustand zu berücksichtigen sind. Bei Annahme bekannter Kosten für die Anpassungsoptionen und eines bekannten Nachfrageszenarios wären nun die minimalen Kosten über den Lebenszyklus durch Auswahl der optimalen Abfolge von Anpassungsoptionen zu bestimmen.

Aufgrund der Langfristigkeit der Entscheidungen ist jedoch die Unsicherheit der Eingangsdaten zu berücksichtigen. Hierbei kann eine zweistufige Struktur des Problems beobachtet werden: Während der Planungsphase sind zunächst nur technische Eigenschaften der Anlage festzulegen, während Programm- und Transportentscheidungen zu einem Zeitpunkt getroffen werden, zu dem die Nachfrage schon eingetreten ist. Für derartige Probleme bietet sich der Ansatz der zweistufigen stochastischen Optimierung an, der jedoch aufgrund seiner Komplexität bis jetzt nur einen eingeschränkten Einsatz gefunden hat. Gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass

eine exakte optimale Lösung des Problems aufgrund der Unsicherheit der Daten nicht unbedingt notwendig ist. Eine Lösung, die nur wenig vom optimalen Ergebnis abweicht, kann bereits eine ausreichende Aussagekraft für die Planung besitzen. Die Untersuchung heuristischer Ansätze erscheint in diesem Zusammenhang sinnvoll und soll im Rahmen dieser Arbeit weiter verfolgt werden. Insbesondere für das hier vorliegende Problem scheinen Genetische Algorithmen aufgrund ihrer Problemunabhängigkeit und dem guten Verhältnis von Laufzeit und Lösungsgüte sowie der Möglichkeit zur Hybridisierung mit exakten Verfahren geeignet.



## **5 Verfahren zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage**

Innerhalb dieses Kapitels werden Verfahren entwickelt, die zur Planung von Fließproduktionssystemstrukturen eingesetzt werden können. Entsprechend den vorangegangenen Kapiteln erfolgt auch hier wieder eine getrennte Darstellung für die Strukturplanung bei offenen und geschlossenen Stationsgrenzen, sowie in einem weiteren Abschnitt für die Anpassungsplanung auf Struktur-ebene.

### **5.1 Verfahren zur Neuplanung von mehrstufigen Fließproduktionssystemstrukturen bei geschlossenen Stationsgrenzen**

#### **5.1.1 Planung der horizontalen Teilung**

Um Struktureinheiten bei der Strukturplanung bilden zu können, ist es zunächst notwendig, das Produktionsprogramm zu analysieren und aufzubereiten. Anhand der Konstruktionszeichnungen oder Prototypen werden dabei Arbeitspläne abgeleitet, in denen definiert wird, welche Arbeitsgänge mit welchen Arbeitsinhalten zur Fertigstellung des Produktes durchzuführen sind. Hierbei ist auch die Reihenfolge der Arbeitsgänge festzulegen. Die Bearbeitungszeiten der einzelnen Arbeitsgänge können z. B. durch Zeitaufnahmen und MTM-Analysen<sup>138</sup> bestimmt werden. Anhand dieser Angaben können nun im Rahmen einer Austaktung die Arbeitsvorgänge und die daran gebundenen Betriebsmittel den einzelnen Arbeitsstationen zugeordnet werden. Die Abbildung 5.1 zeigt dieses Vorgehen für ein Beispiel mit zwei Produktvarianten für die vorab die Arbeitsgänge und Bearbeitungszeiten bestimmt wurden.

---

<sup>138</sup> Methods-Time-Measurement.

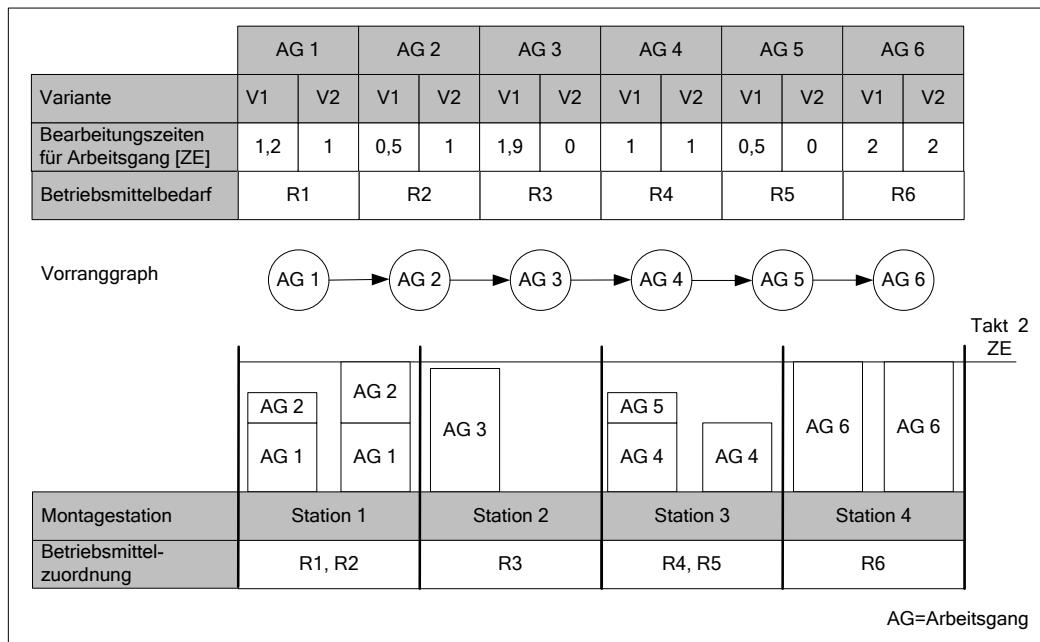


Abbildung 5.1: Austaktung einer Montagelinie mit zwei Produktvarianten

Dieses detaillierte Vorgehen auf Arbeitsgangebene muss jedoch für die Strukturplanung abgewandelt werden, da zum einen verlässliche Daten zu den Bearbeitungszeiten und die möglichen Reihenfolgen noch nicht vorliegen und sich die Taktlänge und damit die Stationszuordnung erst in Folge der Kapazitätsteilung ergeben. Daher soll vereinfacht angenommen werden, dass sich ein Montageablauf in mehrere in sich abgeschlossene Abschnitte gliedert, denen eindeutig bestimmte Arbeitsvorgänge zugeordnet werden können. Dies entspricht der Ausgestaltung von Montagelinien in der Praxis derart, dass dort meist Montageumfänge an einem bestimmten Produktbereich an aufeinander folgenden Stationen durchgeführt werden.<sup>139</sup>

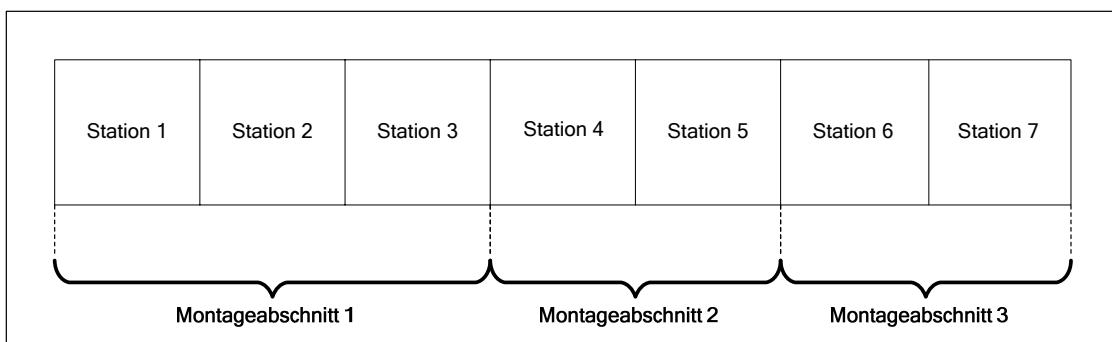


Abbildung 5.2: Beispiel für Montageabschnitte auf einer Linie

Die Anzahl der Stationen und die genaue Zuordnung der Arbeitsinhalte auf Stationen sind bei dieser Betrachtung vorerst unbekannt und werden erst in Anschluss an die Strukturplanung festgelegt. Somit sind auch die zur Montage benötigten Betriebsmittel den Montageabschnitten zuzuordnen. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 5.2 wiedergegeben: Durch die Zuord-

<sup>139</sup> Ursache ist dafür z.B. eine sich ändernde Montageobjektorientierung. So können in der Motorenmontage Montageumfänge an der Abgasseite und dem Zylinderkopf in Abschnitte getrennt werden, da jeweils unterschiedliche Lagen des Motorblocks notwendig sind.

nung einer Produktionsmenge auf die betrachtete Linie wird der Produktionstakt anhand folgender Rechnung ermittelt:

$$Takt = \frac{\text{Arbeitszeit [ZE]}}{\text{Produktionsmenge [Stk.]}} \quad \text{Gl. 5.1-1}$$

Die Anzahl der Stationen ergibt sich nun anhand der Bearbeitungszeit der Variante, die in diesem Abschnitt die höchste Bearbeitungszeit besitzt. Dies ist die unterste Grenze für die Stationszahl dieses Abschnitts bei der Austaktung, da ein Überschreiten der Taktzeit bei geschlossenen Stationsgrenzen ausgeschlossen ist. Die Gesamtanzahl von Stationen (ganzzahlig) und damit die Anzahl der einzusetzenden Arbeitskräfte ergeben sich wie folgt:

$$\text{Anzahl Stationen} = \left\lceil \frac{\sum_{\text{Montageabschnitte}} \text{MAX}(\text{Bearbeitungszeit}_{\text{Montageabschnitt}})}{\text{Takt}} \right\rceil \quad \text{Gl. 5.1-2}$$

Arbeitsgänge				Ressourcen
Montageabschnitt 1	AG 1	AG 2	AG 3	R1, R2, R3
Montageabschnitt 2	AG 4	AG 5	AG 6	R4, R5, R6
Bearbeitungszeiten im Montageabschnitt [ZE]				
Montageabschnitt 1		Montageabschnitt 2		
Produktvariante 1	3,6		3,5	
Produktvariante 2	2		3	

AG=Arbeitsgang

Abbildung 5.3: Montageabschnittszeiten für ein Beispiel mit zwei Produktvarianten

Zur Verdeutlichung soll das Beispiel aus Abbildung 5.1 verwendet werden. Hier können die Arbeitsgänge 1 bis 3 und 4 bis 6 zu Abschnitten zusammengefasst werden (siehe Abbildung 5.3). Die Bearbeitungszeiten der Abschnitte ergeben sich dann aus der Summe der Bearbeitungszeiten der jeweils enthaltenen Arbeitsvorgänge. Die mindestens benötigte Stationsanzahl bei einem Takt von 2 ZE ergibt sich anhand der oben genannten Formel:

$$\text{Anzahl Stationen} = \left\lceil \frac{3,6 \text{ ZE} + 3,5 \text{ ZE}}{2 \text{ ZE}} \right\rceil = \left\lceil \frac{7,1}{2} \right\rceil = 4 \quad \text{Gl. 5.1-3}$$

Die Aufrundung des Ergebnisses entspricht auch der ursprünglichen Lösung von vier Stationen aus Abbildung 5.1. Der Vorteil dieser aggregierten Betrachtung ist die Bestimmung der Stationszahl ohne eine explizite Austaktung der Linie.

Eine weitere notwendige Vorbetrachtung ist die Untersuchung der zur Verfügung stehenden Produktionsfläche, da hierdurch eine Einschränkung der möglichen Stationen bestehen kann.

Dies würde dann dazu führen, dass längere Produktionszeiten (mit entsprechenden Schichtzulagen) als im Kostenoptimum ohne Flächenrestriktion erzwungen werden.

Mit Angaben über die Produktionsfläche, Stationsgröße und weitere Logistikparameter kann die maximal mögliche Stationsanzahl auf der Produktionsfläche als Eingangsparameter für das Modell bestimmt werden (siehe Abbildung 5.4).

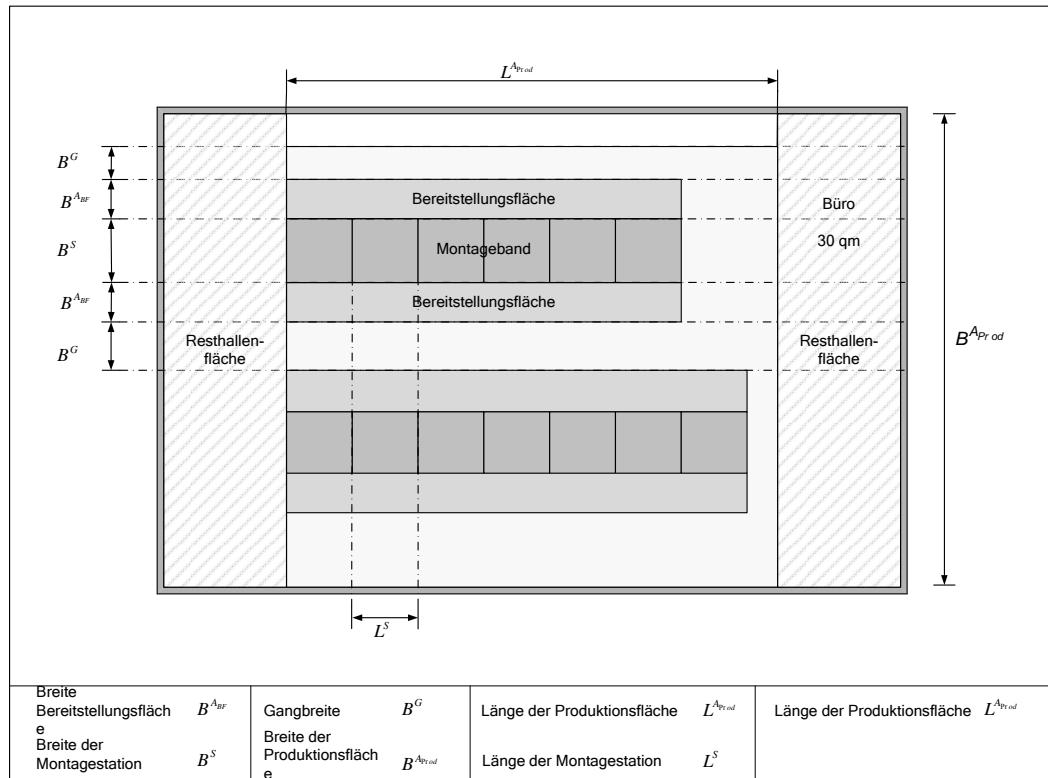


Abbildung 5.4: Prinzipiell geplantes Layout zur Flächenberechnung

Ausgehend von der Breite der Produktionsfläche  $B^{A_{Prod}}$  und unter Einbezug einer vorgeschriebenen Gangbreite  $B^G$ , der Breite der Bereitstellfläche  $B^{A_{BF}}$  zwischen den Montagelinien sowie der Breite der Stationen  $B^S$  wird zuerst die maximale mögliche Anzahl an parallelen „Korridoren“ für Montagelinien  $n^{Linien}$  berechnet.

$$B^{A_{Prod}} = n^{Linien} \cdot B^S + 2 \cdot B^{A_{BF}} \cdot n^{Linien} + (n^{Linien} + 1) \cdot B^G \quad \text{Gl. 5.1-4}$$

$$\frac{B^{A_{Prod}} - B^G}{B^S + 2 \cdot B^{A_{BF}} + B^G} = n^{Linien} \quad \text{Gl. 5.1-5}$$

Darauf folgend ergibt sich die maximale Anzahl an Stationsplätzen  $S^{Max}$  aus der Länge der Produktionsfläche  $L^{A_{Prod}}$  und der Länge der Station  $L^S$ .

$$\frac{L^{A_{Prod}} \cdot n^{Linien}}{L^S} = S^{Max} \quad \text{Gl. 5.1-6}$$

Ausgehend von diesen Vorbetrachtungen kann ein mathematisches Modell mit einer kostenbasierten Zielfunktion und allen relevanten Restriktionen erstellt werden. Das hier zu formulierende Modell wird auf Grund seiner geforderten Nebenbedingungen als gemischt-ganzzahliges Modell (MIP) klassifiziert. Zur Lösung ist das Branch-and-Bound-Verfahren geeignet, das von vielen Standard-Softwares zur Lösung von Optimierungsproblemen zur Verfügung gestellt wird.

Nachfolgend werden die benötigten Mengen, Indizes, Parameter und Entscheidungsvariablen definiert, die für die Aufstellung der Zielfunktion und der Nebenbedingungen benötigt werden.

### Definition der Mengen

$A$	Menge der Montagelinienabschnitte
$L$	Menge der Montagelinien
$Q$	Menge der Schichtmodelle
$R$	Menge der Ressourcen
$V$	Menge der Produktvarianten

### Definition der Indizes

$a$	Montageabschnitt $a \in A$
$l$	Montagelinie $l \in L$
$q$	Schichtmodell $q \in Q$
$r$	Ressource $r \in R$
$v$	Produktvariante $v \in V$

### Gegebene Parameter

$B_v$	Bedarf pro Tag an der Produktvariante $v$
$D^{Planungshorizont}$	Länge des Planungshorizonts in Tagen
$K_r^{Ress}$	Kosten einer Ressource $r$
$K_q^{AK}$	durchschnittliche Kosten einer Arbeitskraft je Zeiteinheit im Schichtmodell $q$
$K^{Linie}$	Aufbaukosten einer Montagelinie
$K^{Station}$	Aufbaukosten für eine Montagestation
$C_l^{Min}$	Minimal möglicher Takt auf Montagelinie $l$

$C_l^{Min,inv}$	Kehrwert des minimal möglichen Takts $C_l^{Min}$ auf Montagelinie $l$ mit
	$C_l^{Min,inv} = \frac{1}{C_l^{T,Min}}$
$O_q$	Anzahl der Schichten pro Tag im Schichtmodell $q$
$Stat^{Max}$	theoretisch maximale Anzahl an Stationsplätzen
$K^{Schicht}$	Kapazitätsangebot je Schicht in Zeiteinheiten
$T_{v,a}$	Montageabschnittszeit, die eine Produktvariante $v$ im Montageabschnitt $a$ benötigt
$U_{v,r}$	Ressourcenbedarf einer Produktvariante $v$ an der Ressource $r$ . 1 für Bedarf liegt vor, 0 sonst.
$W_{r,ma}$	Ressource $r$ liegt im Montagelinienabschnitt $a$ . 1 für ja, 0 sonst.
$E^{Max}$	obere Schranke für $e_{l,a,r}$
$Y^{MaxErsatz1}$	obere Schranke für den Linearisierungsfaktor $y_{l,s}^{Ersatz1}$
$Y^{MaxErsatz2}$	obere Schranke für den Linearisierungsfaktor $y_{l,q}^{Ersatz2}$
$Y^{MaxErsatz3}$	obere Schranke für den Linearisierungsfaktor $y_{l,v}^{Ersatz3}$
$M$	große Zahl (Big-M)
<b><u>Entscheidungsvariablen</u></b>	
$K^{Ges, Linien}$	Gesamtkosten, die durch die Einrichtung von Linien entstehen (Buchhaltervariable)
$K^{Ges, Stationen}$	Gesamtkosten, die durch die Einrichtung von Stationen entstehen (Buchhaltervariable)
$K^{Ges, Ressourcen}$	Gesamtkosten, die durch die Einrichtung von Ressourcen entstehen (Buchhaltervariable)
$K^{Ges, AK}$	Gesamtkosten, die während des Betriebs durch Arbeitskosten entstehen (Buchhaltervariable)
$x_{v,l}$	Zuordnung einer Variante $v$ zur Montagelinie $l$ . 1 für Zuordnung, 0 sonst.
$y_l$	Entscheidung ob Montagelinie $l$ aufgebaut werden soll. 1 für ja, 0 sonst.

$z_{l,q}$	Entscheidung ob Schichtmodell $s$ auf Montagelinie $l$ ausgewählt wird. 1 für ja, 0 sonst.
$e_{l,a,r}$	eine Ressource $r$ wird auf einer Montagelinie $l$ dem Montageabschnitt $a$ zugeordnet. 1 für Zuordnung, 0 sonst.
$c_l$	Takt auf der Montagelinie $l$ in [min/Stück]
$c_l^{inv}$	Kehrwert des Takts $c_l$ auf der Montagelinie $l$ mit $c_l^{inv} = \frac{1}{c_l}$
$dlz_l^{\max}$	Durchlaufzeit der Maximalvariante auf der Montagelinie $l$
$p_{v,l}$	Produktionsmenge der Produktvariante $v$ auf der Montagelinie $l$
$s_l$	Stationsanzahl auf Montagelinie $l$
$t_{l,a}^{\max}$	maximale Bearbeitungszeit in einem Montageabschnitt $a$ auf der Montagelinie $l$

Für die Entscheidungsvariablen gilt die Nicht-Negativitätsbedingung.

### Ersatzvariablen

$y_{l,q}^{Ersatz1}$	Ersatz variable zur Linearisierung des Terms $z_{l,q} \cdot c_l^{inv}$
$y_{l,q}^{Ersatz2}$	Ersatz variable zur Linearisierung des Terms $s_l \cdot z_{l,q}$
$y_{l,v}^{Ersatz3}$	Ersatz variable zur Linearisierung des Terms $dlz_l^{\max} \cdot x_{v,l}$

### Aufstellen der Zielfunktion

Ziel der Optimierung ist es, die Strukturvariante mit den insgesamt niedrigsten Gesamtkosten auszuwählen. Die Gesamtkosten können dabei in drei Bestandteile gegliedert werden:

- Kosten, die der Einrichtung von Linien zurechnet werden ( $K^{Ges, Linien}$ )
- Kosten, die der Einrichtung von Montagestationen zugerechnet werden ( $K^{Ges, Stationen}$ )
- Kosten, durch den Aufbau von Ressourcen entstehen ( $K^{Ges, Ressourcen}$ )
- Kosten, die während des Betriebes durch den Einsatz von Arbeitskräften entstehen ( $K^{Ges, AK}$ )

Damit ergibt sich das Zielfunktion wie folgt:

$$\text{Minimiere } K^{Ges, Struktur} = K^{Ges, Linien} + K^{Ges, Stationen} + K^{Ges, Ressourcen} + K^{Ges, AK} \quad \text{Gl. 5.1-7}$$

### Aufstellen der Nebenbedingungen

Zunächst sollen die einzelnen Kostenbestandteile der Zielfunktion dargestellt werden. Die Kosten für die Einrichtung von Produktionslinien ergeben sich dabei aus der Entscheidungsvariable  $y_l$ , die angibt, ob eine Linie eröffnet wird, und dem entsprechenden Kostensatz  $K^{Linie}$ .

$$K^{Ges, Linien} = \sum_{l \in L} y_l \cdot K^{Linie} \quad \text{Gl. 5.1-8}$$

Die Kosten für den Aufbau der Stationen können anhand der Anzahl der Stationen je Linie ( $s_l$ ) und dem Kostensatz  $K^{Station}$  bestimmt werden.

$$K^{Ges, Stationen} = \sum_{l \in L} s_l \cdot K^{Station} \quad \text{Gl. 5.1-9}$$

Die Berechnung der Kosten für die Installation von Ressourcen erfolgt über den ressourcenspezifischen Kostenfaktor  $K_r^{Ress}$  und die Entscheidungsvariable  $e_{l,a,r}$ , die angibt, ob eine Ressource dem Montageabschnitt einer Linie zugeordnet ist.

$$K^{Ges, Ressourcen} = \sum_{l \in L} \sum_{a \in A} \sum_{r \in R} e_{l,a,r} \cdot K_r^{Ress} \quad \text{Gl. 5.1-10}$$

Da jeder Montagestation eine Arbeitskraft zugeordnet ist, berechnen sich die Stationskosten aus der Multiplikation der Stationsanzahl  $s_l$  mit der Betriebsdauer und dem schichtabhängigen durchschnittlichen Kostensatz für Arbeitskräfte  $K_q^{AK}$ . Die Betriebsdauer ergibt sich dabei aus der Binärvariablen  $z_{l,q}$ , die angibt, in welchem Schichtmodell die Linie betrieben wird, und der Anzahl der Schichten pro Tag in dem gewählten Schichtmodell  $O_q$ . Um die Betriebskosten mit den Investitionskosten ins Verhältnis zu setzen, muss dieser Term, der bisher nur die Kosten pro Tag angibt, mit der Nutzungsdauer des Produktionssystems multipliziert werden. Damit können die Betriebskosten wie folgt angegeben werden:

$$K^{Ges, AK} = \sum_{l \in L} \sum_{q \in Q} s_l \cdot z_{l,q} \cdot O_q \cdot K^{Schicht} \cdot K_q^{AK} \cdot D^{Planungshorizont} \quad \text{Gl. 5.1-11}$$

Der Ausdruck  $s_l \cdot z_{l,q}$  ist aufgrund der Multiplikation zweier Entscheidungsvariablen nichtlinear und muss im Folgenden durch weitere Nebenbedingungen linearisiert werden (siehe Gl. 5.1-22 bis 25).

Zunächst wird jedoch das Zuordnungsproblem formuliert. Hierbei werden die Produktvarianten  $v$  den Montagelinien  $l$  zugeordnet. Dies geschieht mit Hilfe der Entscheidungsvariablen  $x_{v,l}$ , durch die bestimmt wird, ob eine Variante auf einer Linie produziert wird oder nicht. Durch die Nebenbedingung Gl. 5.1-12 wird sichergestellt, dass jede Produktvariante genau einer Linie

zugeordnet wird. Aufgrund der gewählten statischen Betrachtung ist diese Formulierung vorteilhaft, da keine Flexibilität gefordert wird und Redundanzkosten vermieden werden.

$$\sum_{l \in L} x_{v,l} = 1 \quad \forall v \in V \quad \text{Gl. 5.1-12}$$

Als nächstes muss gewährleistet werden, dass bei der Zuordnung von Varianten auf eine Linie diese auch installiert wird. Dazu muss die entsprechende  $y_l$  Binärvariable gesetzt werden.

$$\sum_{v \in V} x_{v,l} \geq y_l \quad \forall v \in V; l \in L \quad \text{Gl. 5.1-13}$$

Wird eine Variante einer Linie zugeordnet, ist hier die Produktionsmenge  $p_{v,l}$  herzustellen. Die Zahl  $M$  muss ausreichend groß gewählt werden, so dass diese Restriktion für  $x_{v,l} = 1$  den Wertebereich von  $p_{v,l}$  nicht einschränkt.<sup>140</sup>

$$p_{v,l} \leq x_{v,l} \cdot M \quad \forall v \in V; l \in L \quad \text{Gl. 5.1-14}$$

Durch die Nebenbedingung Gl. 5.1-15 wird erreicht, dass die gesamte Produktionsmenge einer Variante auch produziert wird.

$$\sum_{l \in L} p_{v,l} = B_v \quad \forall v \in V \quad \text{Gl. 5.1-15}$$

Als nächstes muss eine Kapazitätsbilanzierung auf den Produktionslinien durchgeführt werden.

Dafür wird der Parameter  $Kapa^{Schicht}$  eingeführt, der Arbeitszeit in Minuten je Schicht angibt. Die Anzahl der Schichten je Schichtmodell wird über den Parameter  $O_q$  angegeben. So hat zum Beispiel das 3-Schichtmodell insgesamt drei zur Verfügung stehende Schichten. Die Entscheidung, welches Schichtmodell auf einer Linie  $l$  angewendet wird, drückt sich über die Binärvariable  $z_{l,q}$  aus. Jetzt können Arbeitszeit, Produktionsmenge und Takt zueinander in Beziehung gesetzt werden.

$$c_l = \frac{\sum_{q \in Q} K^{Schicht} \cdot z_{l,q} \cdot O_q}{\sum_{v \in V} p_{v,l}} \quad \forall l \in L \quad \text{Gl. 5.1-16}$$

---

<sup>140</sup> Es bietet sich an, für das Big-M  $M$  einen so großen Wert wie nötig, aber einen so kleinen Wert wie möglich zu wählen. Wenn  $M$  um Größenordnungen höher ist als die anderen Parameterwerte des Modells, kann es bei großen Modellen zu numerischen Ungenauigkeiten und somit zu Konvergenzproblemen kommen (vgl. Suhl; Mellouli (2006), S. 99). Für die Nebenbedingung 5.1-14 sollte  $M_1 \geq \text{Max}(p_{v,l})$  sein.

Die Nebenbedingung soll linearisiert werden. Dazu ist zunächst die Gleichung umzustellen und die Variable  $c_l$  durch  $c_l^{inv}$  zu ersetzen.

$$c_l = \frac{1}{c_l^{inv}} \quad \forall l \in L \quad \text{Gl. 5.1-17}$$

Der Kehrwert des Taktes stellt die Ausbringung des Systems in Stück pro Zeit dar. In der umformulierten Gleichung steht nun die Kapazität in Form Arbeitszeit mal Ausbringung auf der rechten Seite:

$$\sum_{v \in V} P_{v,l} \leq \sum_{q \in Q} K^{Schicht} \cdot z_{l,q} \cdot O_q \cdot c_l^{inv} \quad \forall l \in L \quad \text{Gl. 5.1-18}$$

Da immer nur ein Schichtmodell auf einer Linie gültig sein kann, muss dies als Nebenbedingung formuliert werden.

$$\sum_{q \in Q} z_{l,q} = 1 \quad \forall l \in L \quad \text{Gl. 5.1-19}$$

Durch eine weitere Restriktion kann ein Minimaltakt  $C_l^{Min}$  vorgegeben werden.<sup>141</sup>

$$c_l \geq C_l^{Min} \quad \forall l \in L \quad \text{Gl. 5.1-20}$$

Durch Bilden der Kehrwerte kann dies für  $c_l^{inv}$  umformuliert werden.

$$c_l^{inv} \leq C_l^{Min,inv} \quad \forall l \in L \quad \text{Gl. 5.1-21}$$

Für die Nebenbedingung 5.1-18 besteht folgendes Problem: Die Gleichung ist an der Stelle  $z_{l,q} \cdot c_l^{inv}$  aufgrund der Multiplikation zweier Entscheidungsvariablen nichtlinear. Daher wird eine Ersatzvariable  $z_{l,q}^{Ersatz1}$  zur Linearisierung eingeführt, für die gilt:

$$z_{l,q}^{Ersatz1} = z_{l,q} \cdot c_l^{inv} \quad \forall l \in L, q \in Q \quad \text{Gl. 5.1-22}$$

Die Ersatzvariable  $z_{l,q}^{Ersatz1}$  muss durch geeignete Formulierungen „gezwungen“ werden, das Produkt dieser beiden Entscheidungsvariablen anzunehmen. Dazu werden entsprechende Nebenbedingungen zur Festlegung von Ober- und Untergrenzen der Ersatzvariablen formuliert.<sup>142</sup>

$$z_{l,q}^{Ersatz1} \leq Y^{MaxErsatz1} \cdot z_{l,q} \quad \forall l \in L, q \in Q \quad \text{Gl. 5.1-23}$$

<sup>141</sup> Gründe für das Festlegen eines Minimaltaktes lassen sich in der Ergonomie finden, aber auch in einer zu geringen Granularität der Arbeitsvorgänge, durch die eine effiziente Austaktung bei sehr kurzer Taktzeit eingeschränkt wird.

<sup>142</sup>  $Y^{max Ersatz1}$  beschreibt dabei eine genügend große Zahl, die sich anhand der weiter unten beschriebenen Montageabschnittszeiten der Produktvarianten bestimmen lässt.

$$z_{l,q}^{Ersatz1} \leq c_l^{inv} \quad \forall l \in L, q \in Q \quad \text{Gl. 5.1-24}$$

$$z_{l,q}^{Ersatz1} \geq c_l^{inv} - Y^{MaxErsatz1} \cdot (1 - z_{l,q}) \quad \forall l \in L, q \in Q \quad \text{Gl. 5.1-25}$$

Die Gleichungen 5.1-23 bis 25 formulieren dadurch den folgenden Sachverhalt:

$$z_{l,q}^{Ersatz1} = \begin{cases} 0, & \text{falls } z_{l,q} = 0 \\ c_l^{inv}, & \text{falls } z_{l,q} = 1 \end{cases} \quad \forall l \in L, q \in Q \quad \text{Gl. 5.1-26}$$

Somit kann  $z_{l,q}^{Ersatz1}$  für das linearisierte Produkt  $z_{l,q} \cdot c_l^{inv}$  in Nebenbedingung 5.1-15 eingesetzt werden.

$$\sum_{v \in V} p_{v,l} = \sum_{q \in Q} K^{Schicht} \cdot z_{l,q}^{Ersatz1} \cdot O_q \quad \forall l \in L \quad \text{Gl. 5.1-27}$$

Als nächster Bestandteil sind die technischen Ressourcen in das Modell aufzunehmen. Benötigt eine Variante zur Montage eine bestimmte technische Einrichtung, so muss dies bei der Kapazitätsteilung berücksichtigt werden. Die Überlegung, dass die Zuordnung von Produktvarianten mit gleichem technischen Ressourcenbedarf auf einer Montagelinie die Investitionskosten senkt, veranlasst die Einführung einer entsprechenden Entscheidungsvariable, die diesen Sachverhalt im Modell abbildet. Der Parameter  $U_{v,r}$  gibt dabei an, ob eine Variante  $v$  eine bestimmte technische Ressource  $r$  benötigt. Über den Parameter  $W_{r,a}$  wird zusätzlich festgelegt, in welchem Montageabschnitt diese Ressource zu installieren ist.<sup>143</sup> Über die Entscheidungsvariable  $e_{l,a,r}$  kann nun ein Zusammenhang zwischen der Varianten- und Ressourcenzuordnung hergestellt werden.  $E^{Max}$  stellt hierbei eine genügend große Zahl dar, die die linke Seite der Gleichung bei  $e_{l,a,r} \geq 1$  nicht einschränken darf.<sup>144</sup>

$$\sum_{v \in V} x_{v,l} \cdot U_{v,r} \cdot W_{r,a} \leq e_{l,a,r} \cdot E^{Max} \quad \forall l \in L, r \in R, a \in A \quad \text{Gl. 5.1-28}$$

Als nächstes ist die Stationsanzahl  $s_l$  der Linien zu bestimmen, da diese für die Berechnung der Stations- und Arbeitskosten in der Zielfunktion benötigt wird. Die Stationszahl kann bei geschlossenen Stationsgrenzen über die Montageabschnittszeiten  $T_{v,a}$  der zugeordneten Varianten und den Takt einer Linie berechnet werden. Es gibt dabei immer eine Variante, die die längste Montagezeit  $t_{l,a}^{Max}$  in einem Abschnitt besitzt. Diese Variante kann über eine Nebenbedingung bestimmt werden:<sup>145</sup>

<sup>143</sup> Die Angabe des Montageabschnittes ist notwendig, um bei einer vertikalen Trennung der Linie die Zuordnung der Ressourcen zu den Liniensegmenten zu bestimmen.

<sup>144</sup> Für die Zahl sollte daher gelten  $E^{Max} \geq |V|$ .

<sup>145</sup> Durch den Zusammenhang, der in Gl. 5.1-30 und 5.1-32 hergestellt wird, wird  $t_{l,a}^{Max}$  im Sinne der Zielfunktion kleinstmöglichst gewählt.

$$T_{v,a} \cdot x_{v,l} \leq t_{l,a}^{\max} \quad \forall l \in L, a \in A, v \in V \quad \text{Gl. 5.1-29}$$

Aus der Summe dieser längsten Montageabschnittszeiten wird nun eine maximale theoretische Durchlaufzeit auf einer Linie  $dlz_l^{\max}$  berechnet.

$$\sum_{a \in A} t_{l,a}^{\max} = dlz_l^{\max} \quad \forall l \in L \quad \text{Gl. 5.1-30}$$

Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Zusammenhänge muss gelten, dass das Produkt aus Taktzeit und Stationszahl mindestens größer als diese theoretische Durchlaufzeit ist, damit eine gültige Austaktungslösung gefunden werden kann.<sup>146</sup> Hierbei kann nun der Sonderfall ausgenutzt werden, dass keine Teilung der Bedarfe einer Variante vorgenommen werden (siehe Gleichung 5.1-12). Hierdurch gilt nämlich:

$$p_{v,j} = B_v \cdot x_{v,j} \quad \forall l \in L, v \in V \quad \text{Gl. 5.1-31}$$

Hiermit lässt sich nun die Nebenbedingung für die Berechnung der Stationszahl  $s_l$  wie folgt aufstellen:

$$\sum_{q \in Q} s_l \cdot K^{Schicht} \cdot z_{l,q} \cdot O_q \geq \sum_{v \in V} B_v \cdot x_{v,l} \cdot dlz_l^{\max} \quad \forall l \in L \quad \text{Gl. 5.1-32}$$

Auch hier stellt sich erneut das Problem, dass auf der linken Seite der Gleichung mit dem Ausdruck  $s_l \cdot z_{l,q}$ , sowie rechts mit  $dlz_l^{\text{theo}} \cdot x_{v,l}$  keine Linearität besteht. Daher müssen diese Terme ähnlich wie nach 5.2-12 bis 5.4-25 linearisiert werden.

Dazu sind die Ersatzvariablen  $y_{l,q}^{\text{Ersatz2}} = s_l \cdot z_{l,q}$  und  $y_{l,v}^{\text{Ersatz3}} = dlz_l^{\text{theo}} \cdot x_{v,l}$  einzuführen. Die Kenngrößen  $Y^{\text{MaxErsatz2}}$  und  $Y^{\text{MaxErsatz3}}$  sind wieder ausreichend große Zahlen, die aus dem Zusammenhang bestimmt werden können.<sup>147</sup>

Für  $y_{l,q}^{\text{Ersatz2}}$ :

$$y_{l,q}^{\text{Ersatz2}} \leq Y^{\text{MaxErsatz2}} \cdot z_{l,q} \quad \forall l \in L; q \in Q \quad \text{Gl. 5.1-33}$$

$$y_{l,q}^{\text{Ersatz2}} \leq s_l \quad \forall l \in L; q \in Q \quad \text{Gl. 5.1-34}$$

<sup>146</sup> Die hier berechnete Stationszahl  $s_l$  ist dabei als untere Grenze zu verstehen, da es bei der Austaktung dazu kommen kann, dass aufgrund beschränkter Teilbarkeit der Arbeitsprozesse weitere Stationen eingerichtet werden müssen.

<sup>147</sup> Die Hilfskenngröße  $Y^{\text{MaxErsatz2}}$  lässt sich anhand des maximalen Angebots an Montagestationsplätzen  $S^{\max}$  eingrenzen, siehe Gleichung 5.7-13. Die Zahl  $Y^{\text{MaxErsatz3}}$  ist aus dem Maximum der aufsummierter maximalen Montageabschnittszeiten jeder Produktvariante zu bilden:  

$$Y^{\text{MaxErsatz3}} \geq \text{Max} \left[ \sum_{a \in A} \text{Max}(T_{v,a}) \forall v \in V \right].$$

$$y_{l,q}^{Ersatz2} \geq s_l - Y^{MaxErsatz2} \cdot (1 - z_{l,q}) \quad \forall l \in L; q \in Q \quad \text{Gl. 5.1-35}$$

Sowie für  $y_{l,v}^{Ersatz3}$ :

$$y_{l,v}^{Ersatz3} \leq Y^{MaxErsatz3} \cdot x_{v,l} \quad \forall l \in L; v \in V \quad \text{Gl. 5.1-36}$$

$$y_{l,v}^{Ersatz3} \leq dlz_j^{\max} \quad \forall l \in L; v \in V \quad \text{Gl. 5.1-37}$$

$$y_{l,v}^{Ersatz3} \geq dlz_l^{\max} - Y^{MaxErsatz3} \cdot (1 - x_{v,l}) \quad \forall l \in L; v \in V \quad \text{Gl. 5.1-38}$$

Die Ersatzvariablen können nun wieder in die Nebenbedingung 5.1-32 eingebunden werden.

$$\sum_{q \in Q} K^{Schicht} \cdot y_{l,q}^{Ersatz2} \cdot O_q \geq \sum_{v \in V} B_v \cdot y_{l,v}^{Ersatz3} \quad \forall l \in L \quad \text{Gl. 5.1-39}$$

Mit Hilfe der Ersatzvariablen  $y_{l,q}^{Ersatz2}$  kann auch die Gleichung 5.1-11 linearisiert werden. Der entsprechende Ausdruck  $s_l \cdot z_{l,q}$  wird dabei ersetzt.

$$K^{Ges,AK} = \sum_{l \in L} \sum_{q \in Q} y_{l,q}^{Ersatz2} \cdot O_q \cdot Kapa^{Schicht} \cdot K_q^{AK} \cdot D^{Planungshorizont} \quad \text{Gl. 5.1-40}$$

Aufgrund von Flächenrestriktionen kann es notwendig sein, die maximale Stationsanzahl des Liniensystems einzuschränken.<sup>148</sup>

$$\sum_{l \in L} s_l \leq S^{Max} \quad \text{Gl. 5.1-41}$$

Die Betrachtungen zum Modell sind hiermit abgeschlossen. Aufgrund der linearisierten Form aller Gleichungen kann die Optimierung mittels Standardverfahren der Linearen Programmierung gelöst werden.

### 5.1.2 Simultane Planung der vertikalen und horizontalen Teilung

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 gezeigt wurde, kann durch eine vertikale Teilung eine Erhöhung der Effizienz des Fließmontagesystems erreicht werden. Entscheidend ist hierbei, den richtigen Auf trennungspunkt des Systems zu finden. Dies kann mit Hilfe des bereits eingeführten Konzeptes der Montageabschnitte erfolgen, da davon ausgegangen werden kann, dass eine Auf trennung nur nach Ende eines Montageabschnittes sinnvoll ist. Das Montagesystem gliedert sich durch eine solche Auf trennung in einen Vor- und einen Endmontagebereich, für den jeweils getrennt über den Parallelisierungsgrad zu entscheiden ist. Die Form der Parallelisierung bzw. der horizontalen Teilung innerhalb des Montagebereichs kann mittels des im vorangegangenen Abschnitt entwickelten Modells ermittelt werden. Abbildung 5.5 zeigt die möglichen Auf trennungspunkte und Optimierungsprobleme für ein Beispiel. Allgemein kann daraus abgeleitet

werden, dass für eine gegebene Anzahl Montageabschnitte  $2n - 1$  Optimierungen durchgeführt werden müssen, wobei  $n = |A|$  für die Anzahl an Montageabschnitten steht.

	Montageabschnitte			
	MA 1	MA 2	MA 3	MA 4
Kombinationsmöglichkeit 1	VM		EM	
Kombinationsmöglichkeit 2		VM		EM
Kombinationsmöglichkeit 3		VM		EM
Kombinationsmöglichkeit 4		keine Auf trennung		

VM: Vormontagebereich      EM: Endmontagebereich      MA: Montageabschnitt

Abbildung 5.5: Beispiel der Kombinationsmöglichkeiten für Vor- und Endmontagebereiche für vier Montagebereiche

Bei einem Vorgehen zur Suche nach dem günstigsten Auf trennungspunkt sind alle Kombinationsmöglichkeiten zu untersuchen und die Lösung mit den geringsten Gesamtkosten zu bestimmen. Ein entsprechender Algorithmus ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Dabei werden die Eingangsdaten für das Optimierungsmodell aus jeweils getrennt für Vor- und Endmontagebereich übergeben und der jeweilige optimale Parallelisierungsgrad berechnet. Anhand der Ergebnisse ergibt sich die kostengünstigste Systemstruktur.

Aufgrund der algorithmischen Formulierung eignet sich die Vorgehensweise bereits für eine rechnertechnische Umsetzung, mit der eine automatisierte Entscheidungsunterstützung realisiert werden kann.

<sup>148</sup> Siehe Vor betrachtungen auf S. 72.

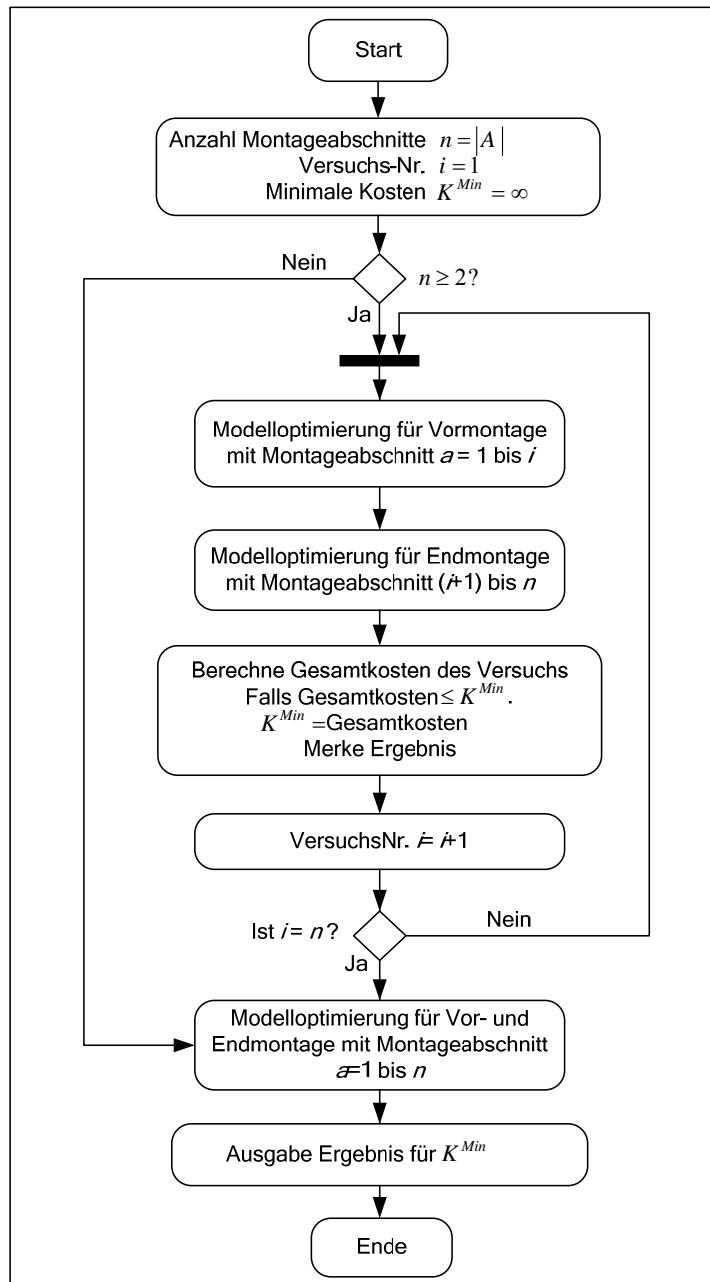


Abbildung 5.6: Algorithmus zur Bestimmung des optimalen Auf trennpunktes zwischen Vor- und Endmontage bei geschlossenen Stationsgrenzen

## 5.2 Verfahren zur Neuplanung von Fließproduktionssystemstrukturen bei offenen Stationsgrenzen

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 gezeigt, ist die Zielsetzung bei der Kapazitätsteilung von Fließproduktionslinien mit offenen Stationsgrenzen nicht direkt aus der Bestimmung der Strukturelemente abzuleiten. Dennoch sind hier Kostenpotenziale in Folge von Varianzreduktion an den Stationen zu erwarten, für deren Erreichung ein entsprechendes Verfahren entwickelt werden soll. Auch hier erfolgt eine Aufteilung der Darstellung in die beiden Schritte Ansatz und Vorgehen.

Durch offene Stationsgrenzen kann prinzipiell eine beliebig große Varianz der Belastungszeiten an den Arbeitsstationen abgebildet werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die durchschnittliche Belastungszeit der Stationen die Taktzeit nicht übersteigt und die Driftbereiche zwischen den Stationen ausreichend groß sind. Dabei kann durch eine Reihenfolgebildung der Aufträge das Ziel verfolgt werden, das Abdriftverhalten der Mitarbeiter von ihren Arbeitsstationen im Zeitverlauf zu minimieren. Liegen jedoch Einschränkungen der Driftbereiche vor, wird die Reihenfolgebildung obligatorisch, um den Einsatz von Unterstützungsarbeitskräften in Folge von reihenfolgebedingten Überlastungen zu reduzieren. Da es jedoch fast nie möglich ist, die Belastungsspitzen durch Reihenfolgebildung soweit abzubauen, dass kein Überschreiten der Driftgrenzen stattfindet, wird der Einsatz von Unterstützungsarbeitskräften notwendig.

Um die Wahrscheinlichkeit von Überschreitungen der Driftgrenzen und damit von Unterstützereinsätzen zu verringern, kann auch die durchschnittliche Auslastung der Stationen verringert werden. Diese Maßnahme führt jedoch ebenfalls zu einer Erhöhung der Personalkapazität, so dass Austaktung und Reihenfolgebildung als integriertes Planungsproblem mit dem Ziel der Arbeitskräfte minimierung zu betrachten sind.

Daraus kann abgeleitet werden, dass Ursache der Austaktungs- und Reihenfolgeproblematik die abzubildende Varianz der Vorgabezeiten der Aufträge ist. Kann diese gesenkt werden, lässt sich eine im Durchschnitt höhere Stationsauslastung bei gleichzeitiger Verringerung des Driftverhaltens erreichen. Dadurch sinkt auch die Wahrscheinlichkeit des Übertretens von Driftgrenzen durch die Mitarbeiter und somit die Anzahl einzusetzender Unterstützungsarbeitskräfte.

Das Absenken der Schwankungsbreite der Vorgabezeiten kann zum einen produktseitig durch eine Verlagerung von Arbeitsinhalten mit starker Zeitspreizung in ungetaktete Vormontagebereiche erreicht werden.<sup>149</sup> Zum anderen kann die Absenkung der Schwankungen aber auch durch eine gezielte Zuordnung von Kundenaufträgen auf parallele Fließproduktionslinien erreicht werden. Das Absenken der Varianz der Bearbeitungszeiten in den einzelnen Stationen bzw. Montageabschnitten kann somit als Ersatzziel aufgefasst werden.

Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein paralleler Produktionslinien. Die Entscheidung über das Einrichten paralleler Linien kann dabei anhand von Kapazitätsüberlegungen erfolgen, da eine direkte Argumentation über die Stationsanzahl wie im Fall der geschlossenen Stationsgrenzen durch die Möglichkeit des Driftens nicht genutzt werden kann. Prinzipiell kann jedoch davon ausgegangen werden, dass aus technischen und ergonomischen Gesichtspunkten ein Mindesttakt vorliegt. Gleichzeitig ist es aus Gründen der Standardisierung sinnvoll, auf allen Parallellinien denselben Takt zu nutzen. Damit lässt sich die Anzahl einzurichtender paralleler Linien wie folgt abschätzen:

$n^{\text{Linien}}$	Anzahl paralleler Linien
$B$	Bedarf pro Tag [Stück]
$T^{\text{Betrieb}}$	maximale Betriebszeit pro Tag [Minuten]

<sup>149</sup> Dieser Ansatz wird beispielsweise im Rahmen von Modularisierungsstrategien verfolgt.

$C^{Min}$  minimaler Takt [Minuten/Stück]

$$n^{Linien} \geq \frac{B}{T^{Betrieb} \cdot C^{Min}} \quad \text{Gl. 5.2-1}$$

In der Praxis werden die Linien jedoch oftmals nicht vollflexibel ausgelegt, so dass nicht alle Aufträge auf allen Linien baubar sind. Hierbei sind zum Beispiel Linienkonzepte denkbar, bei denen bestimmte seltene oder aufwändige Ausstattungsmerkmale nur auf bestimmten Linien verbaubar sind. Um dennoch eine möglichst 100%ige Lieferfähigkeit während der Betriebsphase sicherzustellen, sollte das zukünftige Produktionsprogramm im Rahmen einer Flexibilitätsplanung untersucht werden. Dies erfolgt üblicherweise durch die Untersuchung von Szenarien, die mögliche Entwicklungen des zukünftigen Produktionsprogramms darstellen.<sup>150</sup> Für ein gegebenes Nachfrageszenario kann dann bestimmt werden, ob ein gültiges Produktionsprogramm ohne Fehlmengen gefunden werden kann. Dazu werden die Aufträge eines Nachfrageszenarios bezüglich ihrer Baubarkeit in Gruppen eingeteilt. Für jede Gruppe ist genau bekannt, auf welchen Linien sie gebaut werden kann. Mit Hilfe eines einfachen linearen Programms kann dann bestimmt werden, ob alle Aufträge baubar sind oder ob Fehlmengen auftreten.

#### Definition der Mengen

$L$  Menge der Linien

$G$  Menge der Produktgruppen

#### Definition der Indizes

$l$  Index der Linie mit  $l \in L$

$g$  Index der Produktgruppe  $g \in G$

#### Gegebene Parameter

$B_g$  Bedarf von Produktgruppe  $g$

$K_l$  Kapazität der Linie  $l$

$\Gamma_{g,l}$  legt fest, ob eine Produktgruppe  $g$  auf einer Linie  $l$  gefertigt werden kann. 1 für ja, 0 sonst.

#### Entscheidungsvariable

$p_{g,l}$  Produktionsmenge von Produktgruppe  $g$  auf Linie  $l$

Als Zielfunktion wird hier die Minimierung der Fehlmenge genutzt. Wird ein Zielfunktionswert  $> 0$  erreicht, konnte keine vollständige Zuordnung der Aufträge auf Linien erreicht werden.

---

<sup>150</sup> Siehe dazu auch die Problemstellung zur Planung unter Unsicherheit, Abschnitt 2.2.3.

$$\text{Minimiere Fehlmenge} = \sum_g B_g - \sum_g \sum_l p_{g,l} \quad \text{Gl. 5.2-2}$$

Durch Nebenbedingungen muss sichergestellt werden, dass die verfügbaren Kapazitäten und Baubarkeitsrestriktionen eingehalten werden und dass maximal für den Bedarf produziert wird.

$$\sum_g p_{g,l} \leq K_l \quad \forall l \quad \text{Gl. 5.2-3}$$

$$p_{g,l} \leq \Gamma_{g,l} \cdot K_l \quad \forall g, l \quad \text{Gl. 5.2-4}$$

$$\sum_l p_{g,l} \leq B_g \quad \forall g \quad \text{Gl. 5.2-5}$$

Nur Konzepte, die mit einer ausreichend hohen Wahrscheinlichkeit die gewünschte Lieferfähigkeit erfüllen, werden für die weiteren Untersuchungen herangezogen.<sup>151</sup>

Ziel ist es nun, wie in Kapitel 2.2.2 dargestellt das Produktionsprogramm so auf die parallelen Linien zu verteilen, dass die Produktionsprogramme auf den einzelnen Linien eine möglichst geringe Schwankung der Bearbeitungszeiten aufweisen. Dieses varianzminimierte Produktionsprogramm kann dann als Eingangsinformation für die Austaktung und Reihenfolgeplanung verwendet werden.

In der Praxis ist üblicherweise davon auszugehen, dass der Zeitraum, für den eine Austaktung vorgenommen wird, größer ist als der Zeitraum, für den eine stabile Auftragsreihenfolge gebildet werden kann. Ein weiterer Aspekt, der die simultane Planung verhindert, ist die Komplexität, die sich aus der Anzahl zu berücksichtigender Aufträge und Varianten ergibt. Da während der Planungsphase bereits ein Plan-Produktionsprogramm zur Verfügung steht, das die zukünftigen tatsächlichen Produktionsaufträge repräsentiert, kann dieses für das Zuordnungsverfahren verwendet werden. Das Ergebnis der Zuordnung wird anschließend auf die für die Austaktung relevanten Eigenschaften untersucht, die als Grundlage für die Aufgabe der Auftragszuordnung herangezogen werden können. Dazu gehören insbesondere die durchschnittlichen Bauraten der Arbeitsvorgänge und die Maximalbelastungen. Während des Betriebes sind dann die tatsächlichen Kundenaufträge so den Linien zuzuordnen, dass diese möglichst gering von diesen Vorgaben abweichen. Zur Verbesserung der Vorgaben kann dann die Zuordnung und damit auch die Austaktung der Linien im Zeitverlauf anhand verbesserter Prognosen oder konkreter Produktionsaufträge im Rahmen einer Rekonfiguration angepasst werden.

Somit ist es das Ziel der Auftragszuordnung, den Linien möglichst Aufträge mit ähnlichem Belastungsverhalten zuzuordnen. Das Kriterium für die Ähnlichkeit ist dabei der Unterschied der Bearbeitungszeiten in den Montageabschnitten bzw. an den Stationen. Zu beachten ist, dass die

---

<sup>151</sup> Die Wahrscheinlichkeit der Lieferfähigkeit kann bestimmt werden, indem den Szenarien Einzelwahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Siehe dazu auch die Methoden aus Kapitel 3.3.

Ähnlichkeit zweier Aufträge dabei über alle Abschnitte bewertet wird und damit ein geeignetes Ähnlichkeitsmaß zu bestimmen ist.

Die Ansätze der bekannten Clustering-Verfahren aus Kapitel 3.2.2 können auf das hier dargestellte Problem übertragen werden. Da die Objekte eines Clusters mit dem Auftragsvolumen einer Linie übereinstimmen, entspricht die Clusterzahl der Linienanzahl. Eine weitere Anpassungsmaßnahme wird notwendig, wenn bestimmte Baubarkeitsrestriktionen der Linien vorliegen und nicht jeder Auftrag auf jeder Linie baubar ist. Auch in diesem Fall ist eine Zuordnung zu finden, die das Ziel einer möglichst geringen Varianz der Bearbeitungszeiten bei gleichzeitiger Einhaltung der Baubarkeitsrestriktionen erreicht.

Prinzipiell kann jeder Auftrag als Vektor dargestellt werden, dessen Elemente die Bearbeitungszeiten darstellen. Durch das Clustering-Verfahren sind die Aufträge so in Cluster einzuteilen, dass innerhalb der Cluster eine möglichst geringe Varianz der Bearbeitungszeiten vorliegt. Dazu ist ein geeignetes Distanzmaß zu bestimmen. Da die Varianz als Bewertungsgröße herangezogen wird, eignet sich hier die euklidische Distanz aufgrund der ebenfalls quadratischen Bewertung von Abweichungen.

Als Grundlage für die Entwicklung erscheint insbesondere das *k*-means-Verfahren geeignet, da es als partitionierendes Verfahren eine beliebige Zahl von Clustern erzeugen kann und sehr gute Laufzeiteigenschaften aufweist. Ein entsprechend an diese Anforderungen angepasstes Verfahren soll im Folgeabschnitt dargestellt werden.

Die Erstellung des Zuordnungsverfahrens erfolgt auf Basis des *k*-means-Algorithmus. Dazu muss der Algorithmus so erweitert werden, dass gleichmäßig große Cluster entstehen. Dies erfolgt dadurch, dass vor der Zuordnung eines Auftrages zunächst geprüft wird, ob der Cluster noch freie Kapazitäten hat. Trifft das nicht zu, wird der Auftrag dem nächst näheren Cluster zugeordnet. Um eine möglichst gute Konvergenz zu einem Optimum zu erreichen, wird auch hier der Algorithmus mehrfach hintereinander ausgeführt, wobei jeweils eine Neubestimmung der Clusterzentren durch Mittelwertbildung durchgeführt wird. Erst wenn keine Neuzuordnung von Aufträgen mehr erfolgt, wird der Algorithmus abgebrochen. Der Ablauf des entwickelten Algorithmus ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

Die Auswahl der initialen Clusterzentren kann dabei anhand von drei Ansätzen erfolgen:

- Zufällige Bestimmung der Clusterzentren: Die Auftragsvektoren werden zufällig erzeugt. Für jedes Element des Auftragsvektors wird per Zufall ein Wert innerhalb vorher ermittelter Grenzen bestimmt.
- Zufällige Auswahl von Aufträgen: Es werden zufällig Aufträge aus dem Auftragsportfolio gewählt, die als Clusterzentren dienen.
- Durch gezielte Wahl anhand Gesamtzeiten: Die zuzuordnenden Aufträge werden anhand ihrer Gesamtzeiten sortiert. Bei  $n$  Clustern werden dann anschließend  $n$  Aufträge ausgewählt, die in der sortierten Liste möglichst gleichweit voneinander entfernt stehen.

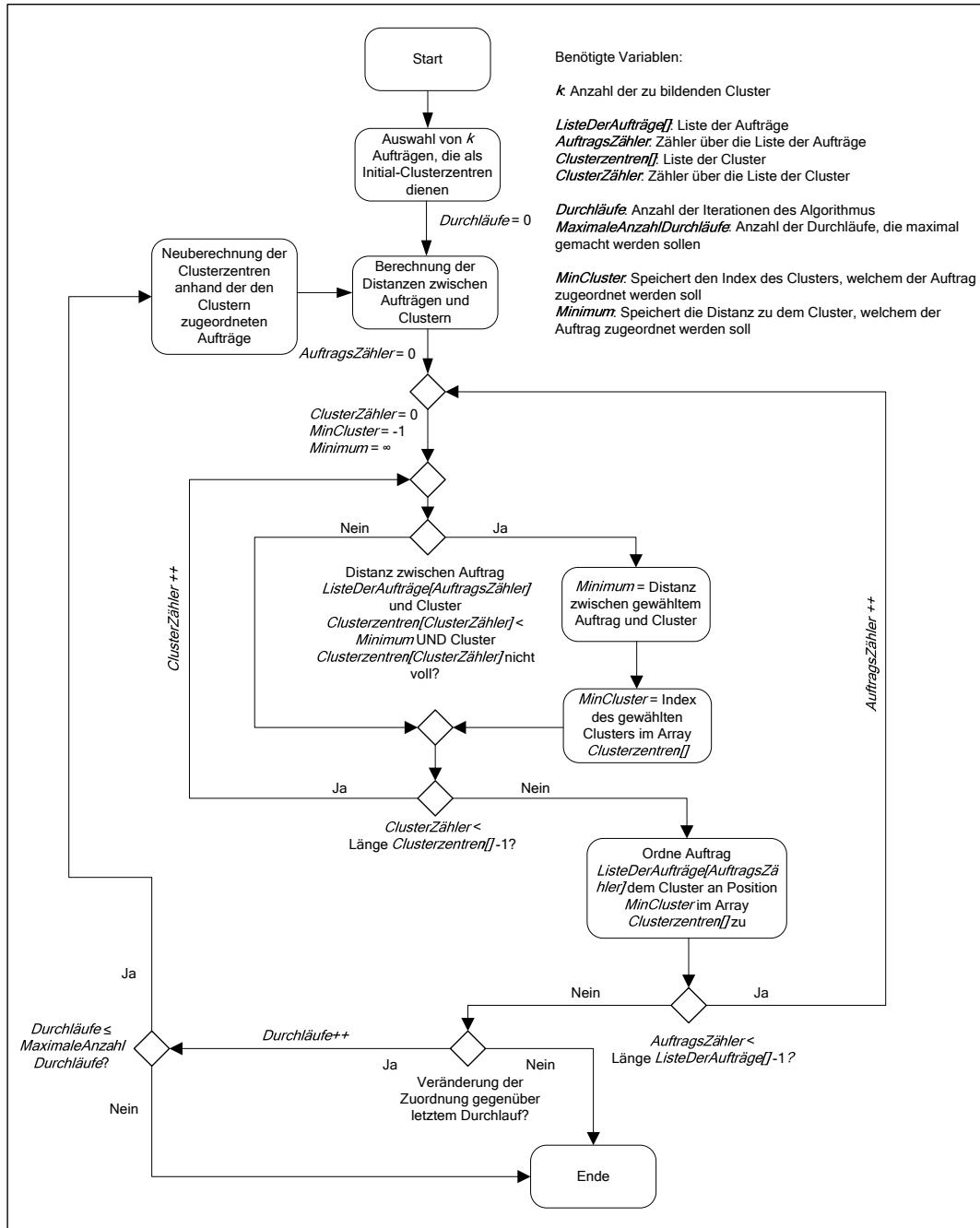


Abbildung 5.7: Algorithmus zur Auftragszuordnung ohne Ressourcenbeschränkungen

In der Realität kann es dazu kommen, dass bestimmte Aufträge nicht auf allen Linien baubar sind. Diese Information kann in den Auftragsvektor durch zusätzliche Elemente berücksichtigt werden, die angeben, ob ein Auftrag eine bestimmte Ressource benötigt oder nicht (binäre Codierung). Bei der Auftragszuordnung muss dann sichergestellt werden, dass der Cluster, dem der Auftrag zugeordnet wird, über die benötigten Ressourcen verfügt. Aufgrund der sequenziellen Form des  $k$ -means-Algorithmus kann es aber dazu kommen, dass später folgende Aufträge nicht mehr zugeordnet werden können, obwohl prinzipiell eine vollständige gültige Zuordnung existiert. Dies kann durch mehrere Anpassungen umgangen werden.

Zunächst kann durch eine Sortierung der Aufträge erreicht werden, dass zuerst die Aufträge zugeordnet werden, die nur auf wenigen Linien gebaut werden können. Dazu werden die Aufträge zu Beginn des Algorithmus aufsteigend nach Anzahl der möglichen Zuordnungen sortiert.

Weiter kann durch eine hohe Gewichtung der Distanzmaße der Binärvariablen, die den Ressourcenbedarf abbilden, bewirkt werden, dass zunächst die Aufträge zugeordnet werden, die dem Ressourcenangebot eines Clusters möglichst genau entsprechen und somit Linien-Cluster mit einem höheren Ressourcenangebot, d.h. also einer höheren Flexibilität, erst später gefüllt werden. Dazu wird das euklidische Distanzmaß entsprechend erweitert:

$V$	Menge der Aufträge
$R$	Menge der Ressourcen
$I$	Menge der Elemente des Montagezeitenvektors
$v, x, y$	Auftrag, $v, x, y \in V$
$r$	Ressource $r \in R$
$i$	Index für Elemente des Montagezeitenvektors $i \in I$
$d^{Gesamt}(x, y)$	Gesamtdistanz zwischen den Aufträgen $x$ und $y$
$E_{v,i}$	Element $i$ des Montagezeitenvektors des Auftrags $v$
$U_{v,r}$	Ressourcenbedarf: 1, falls Auftrag $v$ Ressource $r$ benötigt, 0 sonst
$G$	Faktor zur Gewichtung der Binärdistanzen
$A$	Anzahl der Montageabschnitte

$$d^{Gesamt}(x, y) = \sqrt{\sum_i (E_{x,i} - E_{y,i})^2 + \sum_r (U_{x,r} - U_{y,r})^2} \cdot G \cdot A \quad \text{Gl. 5.2-6}$$

Die letzte hier gewählte Möglichkeit, eine gültige Zuordnung zu erreichen, ist, bereits zugeordnete Aufträge zu verschieben und so Platz für später zuzuordnende Aufträge zu erhalten. Das prinzipielle Vorgehen beim Verschieben ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Hier ist auch bereits eine sortierte Liste der Aufträge vorhanden, jedoch kann der Auftrag 11, der nur auf den Linien 1,2 und 3 baubar ist, nicht mehr zugeordnet werden. Durch Verschieben eines Auftrages von Linie 3 auf Linie 4 kann jedoch eine gültige Zuordnung erreicht werden.

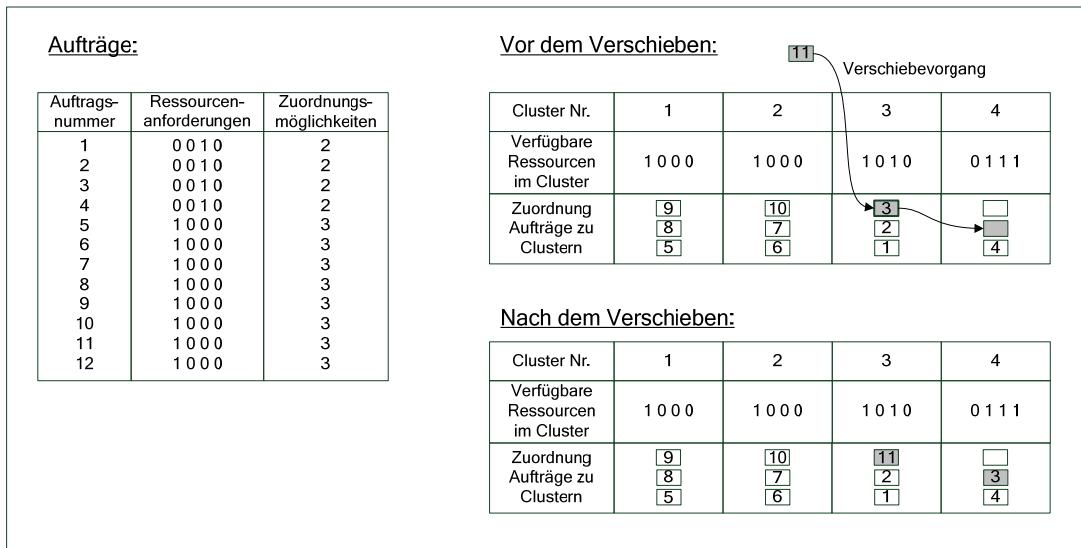


Abbildung 5.8: Zuordnen von Aufträgen durch Verschieben

Ausgehend von diesem Ansatz kann für das Verschieben ein Algorithmus entwickelt werden, der in Abbildung 5.10 dargestellt ist. Dieser Algorithmus kann entsprechend in den Auftragszuordnungsalgorithmus eingebettet werden, der um eine Überprüfung der Ressourcenübereinstimmung erweitert wurde (siehe Abbildung 5.9).

Auch durch das Verschieben kann nicht immer sichergestellt werden, dass eine gültige Auftragszuordnung gefunden wird. Daher wird das Verschieben um eine weitere Strategie ergänzt, die ein mehrstufiges Verschieben ermöglicht. Nachdem durch den Algorithmus zur Auftragsverschiebung für einen neu zuzuordnenden Auftrag alle in Frage kommenden Cluster dahingehend untersucht wurden, ob ein dort bereits zugeordneter Auftrag verschoben werden kann, wird der Algorithmus zum mehrstufigen Verschieben aufgerufen. Dieser prüft ebenfalls wieder für jeden in Frage kommenden Cluster, ob ein enthaltener Auftrag verschoben werden kann, jedoch kann dieser Algorithmus rekursiv aufgerufen werden. Dadurch kann festgestellt werden, ob in einem Cluster durch mehrstufiges Verschieben Platz geschaffen werden kann. Zur Einschränkung der Laufzeit kann die Rekursionstiefe beschränkt werden. Der Ablauf des Algorithmus ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

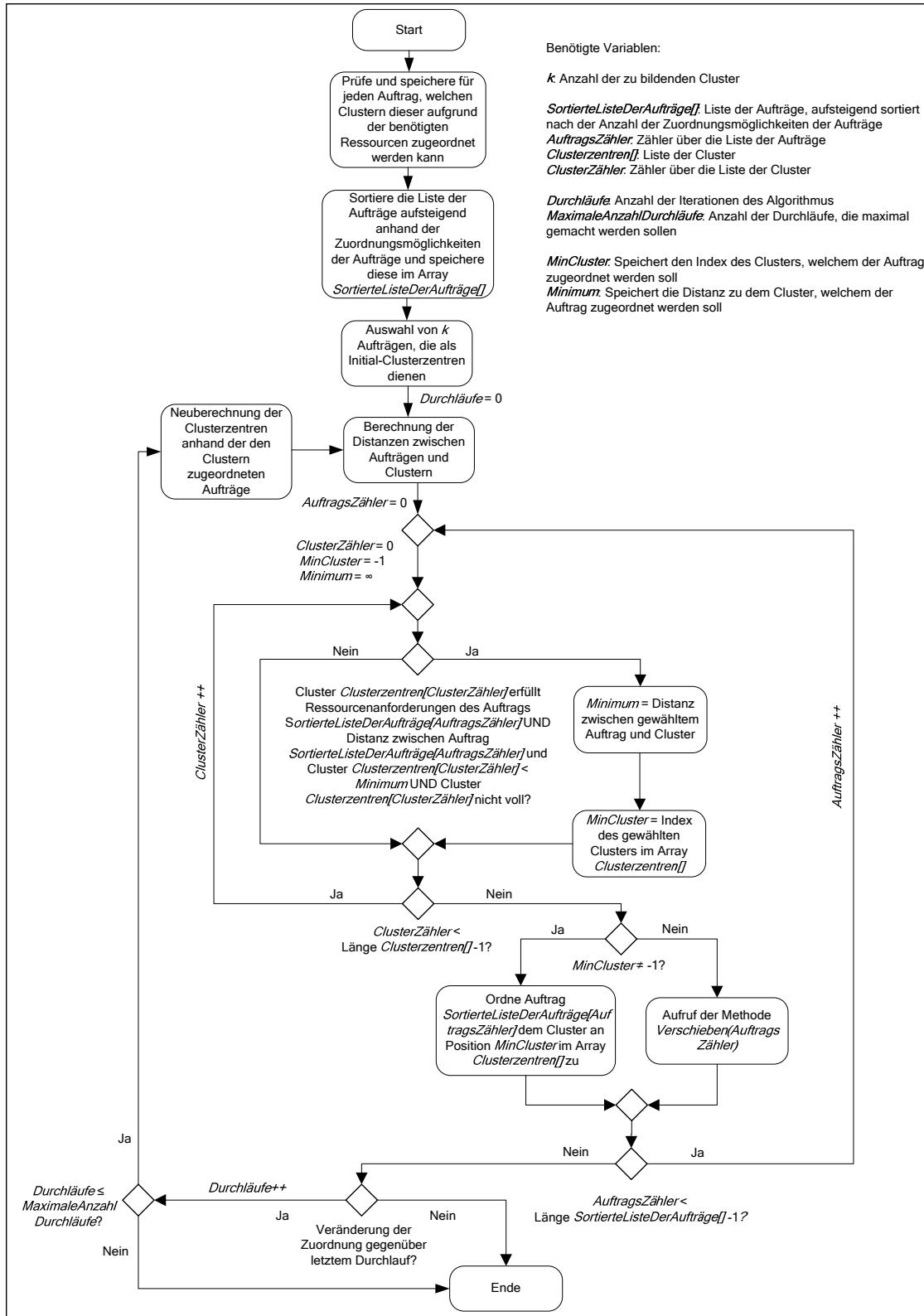


Abbildung 5.9: Algorithmus zur Auftragszuordnung mit Ressourcenbeschränkungen

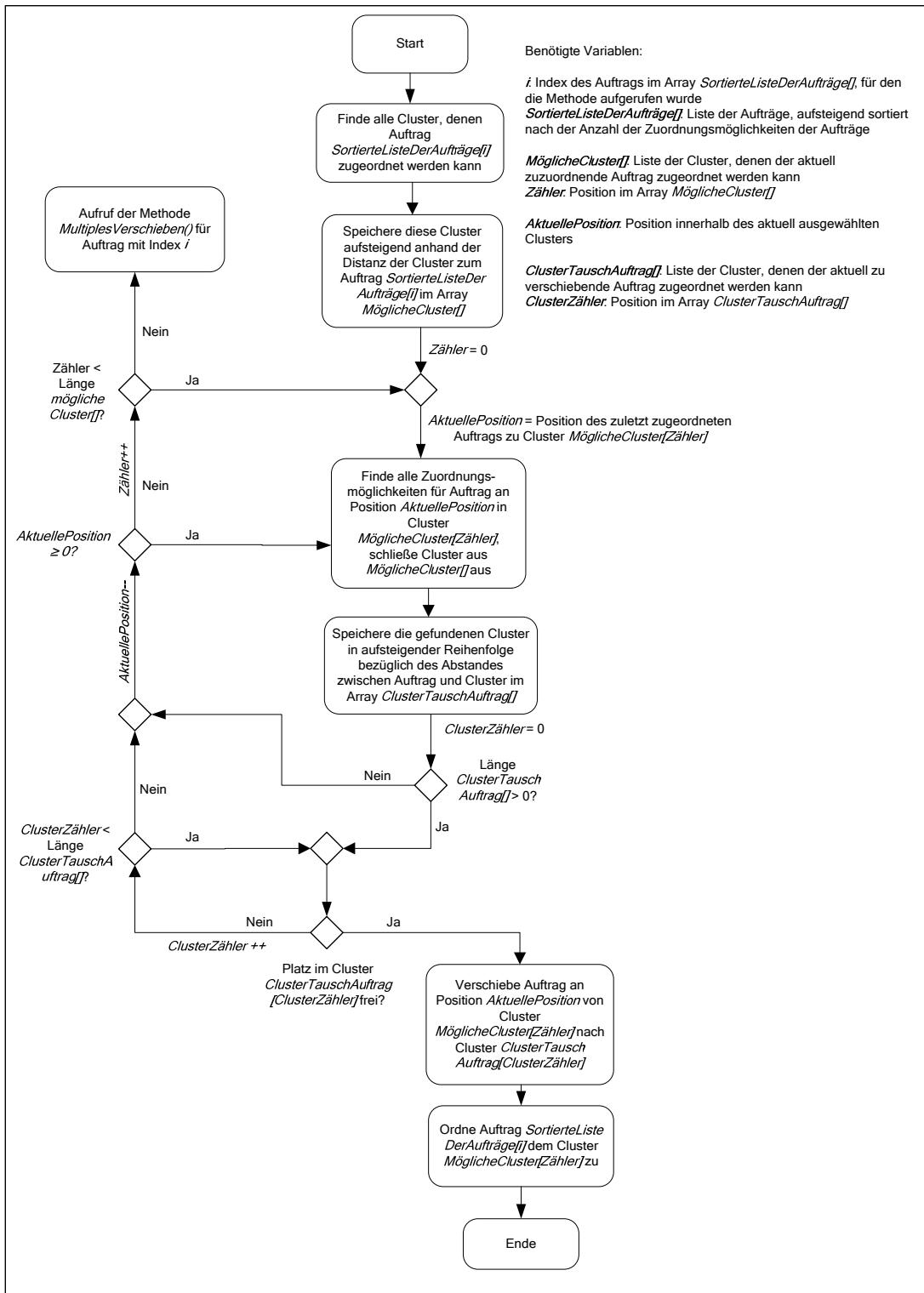


Abbildung 5.10: Algorithmus zur Auftragsverschiebung

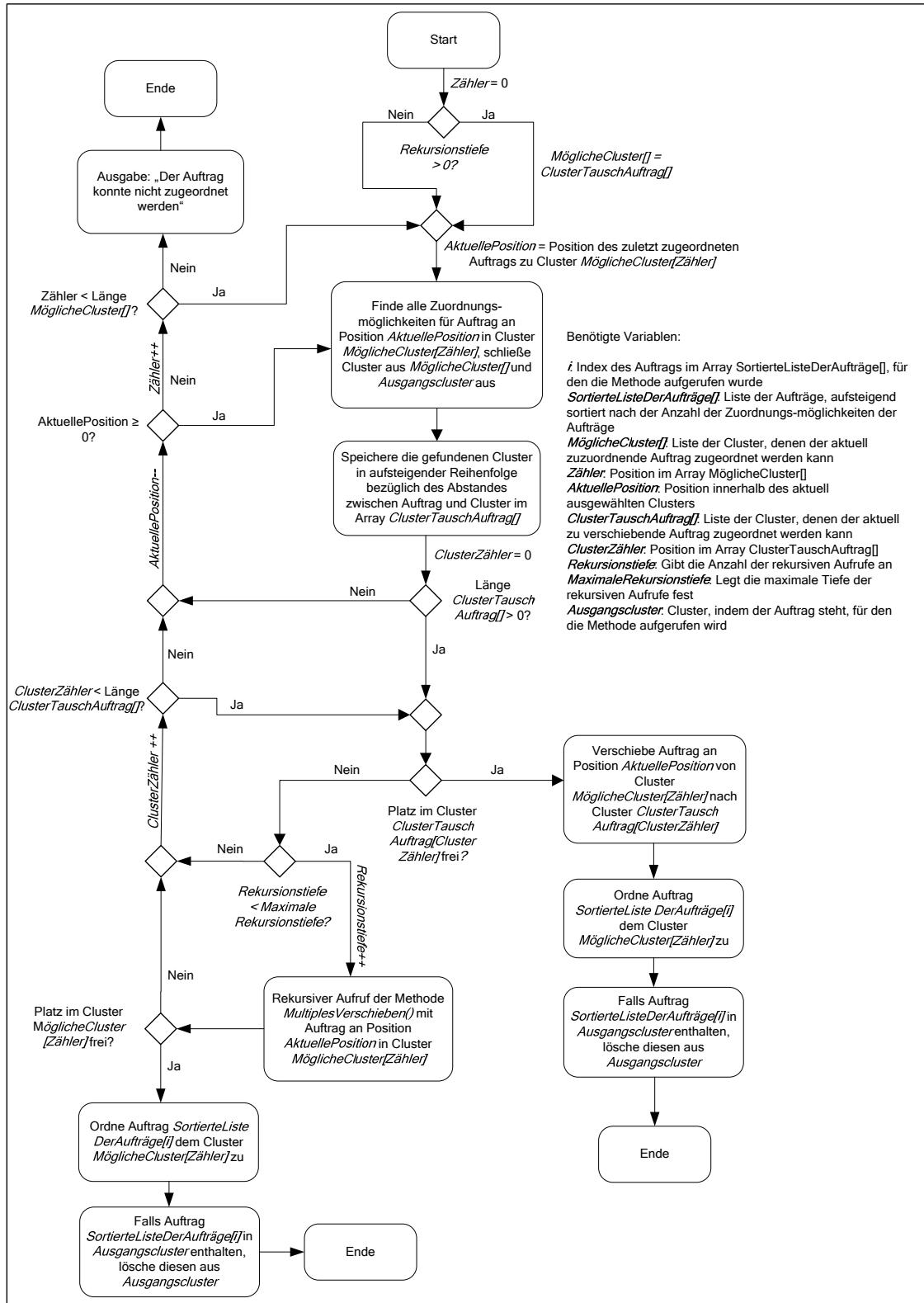


Abbildung 5.11: Algorithmus MultiplesVerschieben

### 5.3 Verfahren zur Anpassungsplanung von Fließproduktionssystemstrukturen unter Unsicherheit

Innerhalb dieses Abschnittes soll ein Verfahren entwickelt werden, das eine Anpassungsplanung von Fließproduktionssystemen auf der Ebene von Struktureinheiten ermöglicht. Lösungsansatz, mathematische Formulierung und eine Lösungsheuristik werden im Folgenden dargestellt.

Wie bereits in Kapitel 2.2.3 festgestellt wurde, lässt sich das Entscheidungsproblem der Anpassungsplanung innerhalb der Strukturplanung als ein zweistufiges Entscheidungsproblem auffassen. Dabei ist auf einer ersten Stufe zu entscheiden, zu welchen Zeitpunkten welche Struktureinheiten bereitzustellen sind, während auf einer weiteren Stufe Entscheidungen zur Nutzung dieser Struktureinheiten getroffen werden. Aufgabe des Modells ist es dabei, eine möglichst optimale Erststufenentscheidung zum Zeitpunkt der Unsicherheit über tatsächlich eintretende Nachfragemengen zu unterstützen.

Die erste Stufe des in dieser Arbeit zu entwickelnden Modells enthält die Entscheidungen, die mit der Produktionstechnik im Zusammenhang stehen (z.B. die Entscheidungen über die Einrichtung von Produktionslinien), da die Festlegung technischer Kapazitäten als nicht revidierbare Entscheidungen angesehen werden. Diese Entscheidungen werden entsprechend der Modellformulierung einmal festgelegt und sind dann für den gesamten Lebenszyklus für jedes Szenario gleich.

In der zweiten Stufe wird über die Nutzung der technischen Einrichtungen entschieden. Die Entscheidungen über Transport- und Produktionsmengen werden dabei unter der Annahme getroffen, dass die einzelnen Szenarien eingetreten sind und hängen von den Erststufenentscheidungen ab. Ziel ist es also, die bestmöglichen Entscheidungen über die technischen Kapazitäten zu treffen. Dies erfolgt anhand der Bestimmung des optimalen Erwartungswertes der entscheidungsrelevanten Kosten über alle Szenarien.

Zielsetzung der Optimierungsaufgabe ist die Minimierung der Kosten. Zukünftige Einzahlungen bzw. Erlöse sind in der Realität üblicherweise schwer zu ermitteln und für die Fragestellung aus Produktionssicht irrelevant. Um eine Vergleichbarkeit der Lebenszykluskosten zu ermöglichen, soll der Kapitalwert verwendet werden. Dazu werden alle Zahlungsströme auf den Beginn des Planungszeitraums abgezinst und aufsummiert. Dies geschieht mit Hilfe des Diskontierungsfaktors. Für eine Auszahlung in Periode  $t$  ergibt sich bei einem Zinssatz von  $i$  der Diskontierungsfaktor wie folgt:

$$\text{Diskontierungsfaktor} = \frac{1}{(1+i)^t} \quad \text{Gl. 5.3-1}$$

Zur Formalisierung des hier vorliegenden Problems kann angenommen werden, dass sich der Planungshorizont in Perioden aufteilt. Für jede Periode existiert dabei eine endliche Anzahl situationsabhängig zulässiger Anpassungsmaßnahmen, sowohl technischer, als auch organisatorischer Art, die jeweils als revidierbar bzw. nicht revidierbar eingestuft werden. Folglich werden in jeder Periode Anpassungsoptionen aus dieser Menge ausgewählt und umgesetzt. Da jede dieser Anpassungsoptionen sowie deren Auswirkungen mit Kosten belegt werden können, kön-

nen die Gesamtkosten einer bestimmten Aufbau- und Anpassungsstrategie mit Hilfe des Kapitalwerts bewertet werden.

Die Anpassungsmaßnahmen in dem Modell werden als diskrete Stufen abgebildet. Dabei wird in Anlehnung an *Tonigold* zwischen technischer und organisatorischer Kapazität unterschieden.<sup>152</sup> Durch eine technische Kapazitätsstufe wird beschrieben, welche technischen Eigenschaften eine Montagelinie besitzt, d.h. welcher Produktionstakt vorliegt und welche Produkte hergestellt werden können. Durch eine organisatorische Kapazitätsstufe wird beschrieben, wie diese technische Kapazität genutzt wird, d.h. in welchem Schichtmodell produziert wird. Da bei einer starren Taktung der Linie bekannt ist, wie viele Produkte innerhalb einer vorgegebenen Zeiteinheit produziert werden, kann für eine gegebene technische und organisatorische Stufe die zur Verfügung stehende Produktionskapazität angegeben werden. Aufgrund dieser Formalisierung können sowohl Kosten für den Wechsel einer Stufe zwischen zwei Perioden als auch für den Betrieb in einer bestimmten Stufe abgebildet werden. Wechselkosten entstehen auf technischer Seite durch den Auf- oder Ausbau von Struktureinheiten, auf organisatorischer Seite durch Einstellungs- und Entlassungskosten. Für den Betrieb einer Struktureinheit in einem bestimmten Zustand, der sich aus technischer und organisatorischer Stufe definiert, können sowohl Fixkosten als auch mengenabhängige variable Kosten hinterlegt werden.

Das Modell soll die Eigenschaften einer mehrstufigen Montage berücksichtigen. Dazu sind die Produkte so abzubilden, dass bestimmte Vormontageprodukte in Endprodukte eingehen. Dieser Zusammenbauprozess kann dabei auch über mehrere Stufen erfolgen. Um abbilden zu können, dass die Montagelinien an verschiedenen Standorten stehen, werden Transportkosten zwischen den Standorten berücksichtigt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Modells ist, dass eine Kompensationsfunktion eingeführt wird. Das bedeutet, dass eine Erfüllung der Nachfrage nicht zwingend erforderlich ist und Fehlmengen auftreten dürfen. Da diese jedoch unerwünscht sind, werden sie mit entsprechenden Kosten in der Zielfunktion bestraft. Ein praktikabler Ansatz ist es hier, die Kosten für Fehlmengen in der Höhe des entgangenen Deckungsbeitrages anzunehmen.

Die Vorbetrachtungen sind damit abgeschlossen und das Optimierungsmodell kann aufgestellt werden. Aufgrund der Zielsetzung einer Lösung mit Hilfe von Standardlösungsmethoden ist hierbei eine vollständige Linearisierung anzustreben.

### 5.3.1 Mathematische Formulierung des Anpassungsproblems

Nachfolgend werden die benötigten Mengen, Indizes, Parameter und Entscheidungsvariablen definiert, die für die Aufstellung der Zielfunktion und der Nebenbedingungen benötigt werden.

#### Definition der Mengen

$S$	Menge der Szenarien
$PE$	Menge der Perioden

---

<sup>152</sup> Vgl. Tonigold (2007).

---

$P$	Menge der Produkte
$VP$	Menge der Vorprodukte
$EP$	Menge der Endprodukte
$L$	Menge der Montagelinien
$VL$	Menge der Vormontagelinien
$EL$	Menge der Endmontagelinien
$M$	Menge der Abnehmer bzw. Märkte
$TS$	Menge der technischen Stufen
$OS$	Menge der organisatorischen Stufen

#### Definition der Indizes

$s$	Szenario, $s \in S$
$pe$	Periode, $pe \in PE$
$p$	Produkt $p \in P$
$vp$	Hilfsindex für Vorprodukte, $vp \in P$
$ep$	Hilfsindex Endprodukte, $ep \in EP$
$l$	Montagelinie $l \in L$
$vl$	Hilfsindex für Vormontagelinien $vl \in L$
$el$	Hilfsindex für Endmontagelinien $el \in L$
$m$	Markt, $m \in M$
$ts$	technische Stufe, $ts \in TS$
$ts2$	Hilfsindex für technische Stufe, $ts2 \in TS$
$os$	organisatorische Stufe, $os \in OS$
$os2$	Hilfsindex für organisatorische Stufe, $os2 \in OS$

#### Gegebene Parameter

$\pi_s$	Wahrscheinlichkeit des Szenarios $s$
$B_{p,m,pe,s}$	Nachfragemenge für das Produkt $p$ am Ort des Marktes $m$ in der Periode $pe$ im Szenario $s$
$\Lambda_{vp,dp}$	Produktstruktur, gibt an, welche Vormontageprodukte $vp$ in welche Endprodukte $dp$ eingehen

$\Gamma_{l,p}$	legt fest, ob ein Produkt $p$ auf einer Linie $l$ gefertigt werden kann. 1 für ja, 0 sonst.
$\Phi_{l,ts,p}$	legt fest, ob ein Produkt $p$ auf einer Linie $l$ im technischen Zustand $ts$ gefertigt werden kann. 1 für ja, 0 sonst.
$K_{l,ts,os}$	Produktionskapazität in Stück pro Periode der Linie $l$ im technischen Zustand $ts$ und im organisatorischen Zustand $os$
$K_{vl,vp,el,ep}^{Transp,yl,el}$	Kosten für den Transport einer Einheit von Vormontageprodukt $vp$ von Vormontagelinie $vl$ zu Endmontagelinie $el$
$K_{vp,l,m}^{Transp,l,m}$	Kosten für den Transport einer Einheit von Produkt $p$ von Linie $l$ zum Ort des Marktes $m$
$K_{l,ts}^{FixTS}$	Fixkosten für die Produktionstechnik, wenn sich die Linie $l$ im technischen Zustand $ts$ befindet
$K_{l,ts,os}^{FixOS}$	Fixkosten für die Nutzung der Linie $l$ , wenn sich diese im technischen Zustand $ts$ und dem organisatorischen Zustand $os$ befindet.
$K_{l,ts,ts2}^{WechselTS}$	Wechselkosten für die Produktionstechnik von Linie $l$ wenn deren technischer Zustand von $ts$ auf $ts2$ geändert wird
$K_{l,ts,os,os2}^{WechselOS}$	Wechselkosten für organisatorische Stufe der Linie $l$ von Stufe $os$ auf Stufe $os2$ , wenn sich diese im technischen Zustand $ts$ befindet
$K_{l,p}^{Fehl}$	Fehlmengenkosten, wenn die Fertigungskapazitäten der Linie $l$ nicht ausreichen, um die Nachfrage nach Produkt $p$ zu erfüllen
$\alpha_{pe}$	Diskontierungsfaktor in der Periode $pe$ zur Berechnung des Kapitalwertes

Die oben aufgeführten Indizes können für die einzelnen Parameter im Modell beliebig kombiniert werden. Dadurch können sehr viele Indexkombinationen entstehen, die Lösbarkeit des Modells erschweren können. Daher ist es sinnvoll, vor einer Implementierung eine Beschränkung der Indexkombinationen auf die tatsächlich vorkommenden Parameter vorzunehmen.

### Entscheidungsvariablen

Aufgrund der zweistufigen Formulierung des Optimierungsproblems sind einige Variablen vom jeweils realisierten Szenario abhängig zu machen. Dies geschieht mit Hilfe des Indexes  $s$ .

$y_{s,vp,ep,vl,el,pe}^{Linien}$	Transportmenge von Produkt $vp$ von Linie $vl$ zu Linie $el$ für ein Produkt $ep$ in Periode $pe$ für Szenario $s$
---------------------------------	--

$y_{s,p,l,m,pe}^{Markt}$	Transportmenge von Produkt $p$ von Linie $l$ zum Ort des Marktes $m$ für Szenario $s$
$p_{s,p,l,pe}$	Produktionsmenge von Produkt $p$ auf Linie $l$ in Periode $pe$ für Szenario $s$
$\lambda_{vp,ep}$	Anzahl der Einheiten von Vormontageprodukt $vp$ , die in Produkt eingehen $ep$
$\omega_{l,ts,ts2,pe}^{TS}$	Variable, die den Wert 1 annimmt, wenn sich der technische Zustand der Linie $l$ in Periode $pe$ von $ts$ auf $ts2$ ändert. Sonst hat die Variable den Wert 0.
$\omega_{s,l,ts,os,os2,pe}^{OS}$	Variable, die den Wert 1 annimmt, wenn sich für Szenario $s$ der organisatorische Zustand der Linie $l$ in Periode $pe$ von $os$ auf $os2$ ändert, wobei der technische Zustand $ts$ konstant bleibt. Sonst hat die Variable den Wert 0.
$z_{p,l,m,pe}$	Gibt die Fehlmenge von Produkt $p$ von Linie $l$ an, die am Markt $m$ in Periode $pe$ entstanden ist
$x_{s,l,ts,os,pe}$	Gibt den Systemzustand einer Linie an: hat den Wert 1, wenn sich Linie $l$ in Periode $pe$ im technischen Zustand $ts$ und im organisatorischen Zustand $os$ befindet, 0 sonst.
$\tau$	Kodierung der Information, an welcher Stelle im System eine nicht erfüllte Nachfrage wirksam sein soll. Dieser Parameter hat den Wert 1, wenn eine Minderbelieferung am Markt entsteht, 0 sonst.
$K^{Ges,WTech}$	Gesamtkosten über dem Lebenszyklus zur technischen Systemanpassung (Buchhaltervariable)
$K_s^{Ges,Org}$	Gesamtkosten über dem Lebenszyklus die aus der Organisation resultieren (Buchhaltervariable)
$K_s^{Ges,WOrg}$	Gesamtkosten über dem Lebenszyklus zur organisatorischen Systemanpassung (Buchhaltervariable)
$K_s^{Ges,TranspL}$	Gesamtkosten über dem Lebenszyklus, die sich aus Transporten zwischen den Linien ergeben (Buchhaltervariable)
$K_s^{Ges,TranspM}$	Gesamtkosten über dem Lebenszyklus, die sich aus Transporten von den Linien an die Märkte ergeben (Buchhaltervariable)

$K_s^{Ges,Fehl}$	Gesamtkosten über dem Lebenszyklus, die sich aus Fehlmengen ergeben (Buchhaltervariable)
------------------	--

### Aufstellen der Zielfunktion

Das Optimierungsmodell wird als zweistufiges stochastisches Programm formuliert. Die zwei Stufen werden in der Zielfunktion durch einen szenarienunabhängigen und einen szenarienabhängigen Teil deutlich. Ziel ist es, den Erwartungswert aller entscheidungsrelevanten Kosten zu minimieren. Damit ergibt sich das Zielfunktion wie folgt:

$$\text{Minimiere } K^{Ges} = K^{Ges,WTech} + \sum_{s \in S} \pi_s \cdot (K_s^{Ges,Org} + K_s^{Ges,WOrg} + K_s^{Ges,TranspL} + K_s^{Ges,TranspM} + K_s^{Ges,Fehl}) \quad \text{Gl. 5.3-2}$$

### Aufstellen der Nebenbedingungen

Zunächst sollen die einzelnen Kostenbestandteile der Zielfunktion definiert werden. Durch die Nutzung einer Linie in einem bestimmten Zustand entstehen bestimmte Fixkosten. Da diese Kosten der zweiten Entscheidungsstufe zugeordnet werden können, ist dieser Kostenbestandteil szenarienabhängig. Die Gesamtfixkosten ergeben sich aus dem Produkt von Diskontierungsfaktor  $K_{l,ts,os}^{FixOS}$ , der Zustandsvariable  $x_{l,ts,os,pe}$  und dem Kostensatz  $\alpha_{pe}$ .

$$K_s^{Ges,Org} = \sum_{l,ts,os,pe} \alpha_{pe} \cdot K_{l,ts,os}^{FixOS} \cdot x_{l,ts,os,pe} \quad \forall s \in S \quad \text{Gl. 5.3-3}$$

Die Entscheidung über die technischen Anpassungen ist szenarienunabhängig und die sich ergebenden Gesamtkosten setzen sich aus der Entscheidungsvariablen  $\omega_{l,ts,ts2,pe}^{TS}$  und dem Kostenfaktor  $K_{l,ts,ts2}^{Wechsel,TS}$  zusammen.

$$K_s^{Ges,WTech} = \sum \alpha_{pe} \cdot K_{l,ts,ts2}^{Wechsel,TS} \cdot \omega_{l,ts,ts2,pe}^{TS} \quad \text{Gl. 5.3-4}$$

Die Berechnung der Kosten für Anpassung auf organisatorischer Seite erfolgt auf die gleiche Weise. Hier ist die Abhängigkeit von der technischen Stufe und vom realisierten Szenario zu beachten.

$$K_s^{Ges,WOrg} = \sum_{l,ts,os,os2,pe} \alpha_{pe} \cdot K_{l,ts,os,os2}^{WechselOS} \cdot \omega_{s,l,ts,os,os2}^{OS} \quad \forall s \in S \quad \text{Gl. 5.3-5}$$

Die Transportkosten werden getrennt für Transporte zwischen den Linien und Transporte von den Linien an die Märkte bestimmt.

$$K_s^{Ges,TranspL} = \sum_{vp,ep,vl,el,pe} \alpha_{pe} \cdot K_{vp,ep,el,ep}^{Transp,vl,el} \cdot y_{s,vp,ep,vl,el,pe}^{Linien} \quad \forall s \in S \quad \text{Gl. 5.3-6}$$

$$K_s^{Ges, TranspM} = \sum_{p,l,m,pe} \alpha_{pe} \cdot K_{p,l,m}^{Transp,l,m} \cdot y_{s,p,l,m,pe}^{Markt} \quad \forall s \in S \quad \text{Gl. 5.3-7}$$

Die Gesamtfehlmengenkosten werden ebenfalls für jedes Szenario erfasst und bestehen aus dem diskontierten Produkt der Fehlmenge und dem entsprechenden Kostensatz.

$$K_s^{Ges, Fehl} = \sum_{p,l,m,pe} \alpha_{pe} \cdot K_{l,p}^{Fehl} \cdot z_{s,p,l,m,pe} \quad \forall s \quad \text{Gl. 5.3-8}$$

Die folgenden Nebenbedingungen berücksichtigen die Veränderungen der technischen und organisatorischen Veränderungen im System. Die Variablen  $\omega_{s,l,ts,os,os2,pe}^{OS}$  und  $\omega_{l,ts,ts2,pe}^{TS}$  geben an, ob sich der Zustand zwischen zwei Perioden ändert. Bei Feststellung eines Wechsels wird die entsprechende Variable 1 gesetzt.

$$\sum_{os} x_{s,l,ts,os,pe=pe-1} + \sum_{os} x_{s,l,ts=ts2,os,pe} \leq 1 + \omega_{l,ts,ts2,pe}^{TS} \quad \forall s, l, ts, ts2, pe \quad \text{Gl. 5.3-9}$$

Im Fall der organisatorischen Wechsel ist zusätzlich auch die Szenarienabhängigkeit auf der rechten Seite der Gleichung zu beachten.

$$\sum_{ts} x_{s,l,ts,os,pe=pe-1} + \sum_{ts} x_{s,l,ts,os=os2,pe} \leq 1 + \omega_{s,l,ts,os,os2,pe}^{OS} \quad \forall s, l, os, os2, pe \quad \text{Gl. 5.3-10}$$

Nach der Aktivierung der Wechselvariablen ist sicherzustellen, dass nur ein Wechsel pro Periode stattfindet.

$$\sum_{ts,ts2} \omega_{l,ts,ts2,pe}^{TS} = 1 \quad \forall l, pe \quad \text{Gl. 5.3-11}$$

$$\sum_{ts,os,os2} \omega_{s,l,ts,os,os2,pe}^{OS} = 1 \quad \forall l, pe \quad \text{Gl. 5.3-12}$$

Außerdem wird durch eine weitere Nebenbedingung sichergestellt, dass eine einmal getroffene technische Entscheidung für alle Perioden gültig ist (d.h. es findet kein Umbau statt).

$$\sum_{ts,ts2 \neq ts,pe} \omega_{l,ts,ts2,pe}^{TS} \leq 1 \quad \forall l \quad \text{Gl. 5.3-13}$$

Zudem wird die Zustandsvariable  $x_{s,l,ts,os,pe}$  mit der Wechselvariable  $\omega_{s,l,ts,os,os2,pe}^{OS}$  in Beziehung gesetzt. Wie oben beschrieben, ist ein organisatorischer Zustand stets von einem technischen Zustand und dem realisierten Szenario abhängig. Findet für ein Szenario und einen gegebenen technischen Zustand ein Wechsel des organisatorischen Zustands der Linie in einer Periode statt, wird durch folgende Nebenbedingung bestimmt, dass sich die Linie für diese Periode und dieses Szenario in dem gleichen technischen Zustand befindet.

$$\sum_{os, os2} \omega_{s,l,ts,os,os2,pe}^{os} = \sum_{os} x_{s,l,ts,os,pe} \quad \forall s, l, ts, pe \quad \text{Gl. 5.3-14}$$

Es kann jeweils nur ein technischer bzw. organisatorischer Systemzustand gültig sein.

$$\sum_{os} x_{s,l,ts,os,pe} \leq 1 \quad \forall s, l, ts, pe \quad \text{Gl. 5.3-15}$$

$$\sum_{ts} x_{s,l,ts,os,pe} \leq 1 \quad \forall s, l, os, pe \quad \text{Gl. 5.3-16}$$

Durch weitere Restriktionen wird dafür gesorgt, dass sich das System in einem gültigen Zustand befindet. Dazu werden die die organisatorischen Zustände auf 0 gezwungen, wenn der technische Zustand ebenfalls 0 ist.

$$x_{s,l,ts=0,os,pe} = 0 \quad \forall s, l, os > 0, pe \quad \text{Gl. 5.3-17}$$

Gleichermaßen lässt sich auf die technischen Zustände anwenden.

$$x_{s,l,ts,os=0,pe} = 0 \quad \forall s, l, ts > 0, pe \quad \text{Gl. 5.3-18}$$

Als nächstes ist eine Kapazitätsrestriktion aufzustellen, die für alle Szenarien, Linien und Perioden sicherstellt, dass die Produktionsmengen auf einer Linie nicht die bereitgestellten Kapazitäten überschreiten.

$$\sum_{ts,os} K_{l,ts,os} \cdot x_{s,l,ts,os,pe} \geq \sum_p p_{s,p,l,pe} \quad \forall s, l, pe \quad \text{Gl. 5.3-19}$$

Durch die nächste Nebenbedingung wird die Kompensationsfunktion in das Modell eingebunden: Im Fall einer Nichterfüllung der Nachfrage wird eine Fehlmenge registriert. Die Variable  $z_{s,p,l,m,pe}$  gibt für alle Produktionslinien die Fehlmenge des Produktes  $p$  auf dem Markt  $m$  in der Periode  $pe$  für das jeweils realisierte Szenario  $s$  an.

$$B_{s,p,m,pe} = \sum_l y_{s,p,l,m,pe}^{Markt} + \tau \sum_l z_{s,p,l,m,pe} \quad \forall s, p, m, pe \quad \text{Gl. 5.3-20}$$

Bei den Transporten wird zwischen zwei Arten unterschieden: Transporten zwischen den Linien und Transporten von den Linien an den Markt. Bei den Transportbeziehungen zwischen den Linien muss sichergestellt werden, dass die durch die Produktstruktur vorgegebenen Mengenverhältnisse eingehalten werden.

$$\sum_{vl} y_{s,vp,ep,vl,el,pe}^{Linien} = \Lambda_{vp,ep} \cdot p_{s,p=ep,l=el,pe} \quad \forall s, vp, ep, el, pe \quad \text{Gl. 5.3-21}$$

Die zweite Transportgleichung legt fest, dass die von einer Linie erstellten Produkte vollständig entweder an die nachfolgenden Linien oder Märkte geliefert werden.

$$\sum_{ep,el} y_{s, vp, ep, vl, el, pe}^{Linien} + \sum_m y_{s, p=vp, l=vl, m, pe}^{Markt} = p_{s, p=vp, l=vl, pe} \quad \forall s, vp, vl, pe \quad \text{Gl. 5.3-22}$$

Alle für das Modell notwendigen Bedingungen sind damit formuliert worden und liegen in linearisierter Form vor. Das Modell kann somit von Standardsolvern zur Lösung linearer Optimierungsprobleme gelöst werden.

### 5.3.2 Lösungsheuristik

Unter der Berücksichtigung einer hohen Anzahl an Szenarien kann das stochastische Programm nicht mehr effizient gelöst werden. Für die Lösung des Problems bietet es sich jedoch an, approximative Lösungsverfahren zu untersuchen, da auch von einer gewissen Unschärfe der Eingangsdaten ausgegangen werden kann. Aufgrund der zweistufigen Struktur des Optimierungsproblems soll hier eine Kombination von exakten Verfahren und Metaheuristiken verwendet werden, die sich bei der Untersuchung des Stands der Technik als geeignet für diese Problemklasse gezeigt hat.<sup>153</sup>

Das Verfahren des hybriden Genetischen Algorithmus soll daher auf das vorliegende Problem übertragen werden. Dazu sind die genetischen Operatoren und die Fitnesswertberechnung problemspezifisch anzupassen. Zunächst sollen einige Variablen für den Genetischen Algorithmus eingeführt werden:

$\mu$	Größe der Elternpopulation
$\lambda$	Anzahl der Nachkommen pro Generation
$t$	Laufender Index für die Generationen
$T$	maximale Generationsanzahl
$\kappa$	Maximales Alter eines Individuums

Als erster Schritt muss der Austausch der Informationen zwischen den Entscheidungsstufen realisiert werden, damit der Ablauf des Algorithmus gewährleistet werden kann. Die Lösung der ersten Stufe enthält die technischen Linienzustände für den gesamten Planungshorizont, die der zweiten Entscheidungsstufe als Restriktionen dienen. Die Information der ersten Stufe kann in Form einer Matrix abgebildet werden, die die Dimensionen *Anzahl Linien*  $\times$  *Anzahl Perioden* hat. Diese Matrix wird auch für die Mutation benötigt. Um den Austausch mit dem MILP-Solver auf der zweiten Stufe zu ermöglichen, muss die Information in der Matrix umformuliert werden, um die Variablen  $\omega_{l,ts,ts2,pe}^{TS}$  zu erhalten. Diese Entscheidungsvariable wird nun nicht mehr innerhalb des mathematischen Modells gelöst, sondern durch die Lösung der ersten Stufe als Restriktion vorgegeben. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Die Information über die technischen Stufen in den einzelnen Perioden wird zusammen mit dem Alter und dem Fitnesswert innerhalb eines Individuums gespeichert. Neben diesen Objektparametern

---

<sup>153</sup> Siehe Kapitel 3.3.5.

wird in einem weiteren Strategieparameter abgespeichert, welche Mutationsstrategie als letztes angewendet wurde.

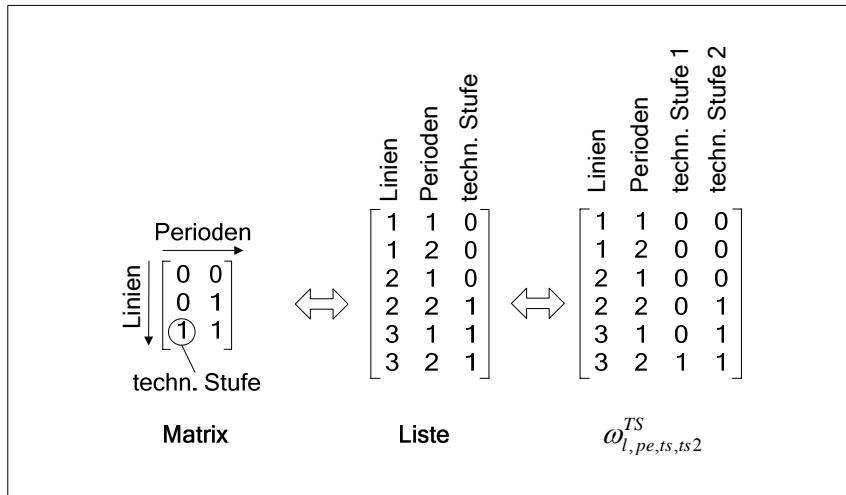


Abbildung 5.12: Zusammenhang zwischen der Genom-Matrix und der Solver-Information

### Initialisierung

Während der Initialisierung werden  $\mu$  Individuen durch einen Zufallsgenerator erzeugt. Hierbei werden nur Szenarien erzeugt, die für jede Linie maximal einen technischen Wechsel über alle Perioden enthalten. Die Anzahl der in der Initialisierung erzeugten Individuen kann als Parameter des Genetischen Algorithmus gesteuert werden und hat Einfluss auf die Suchgeschwindigkeit und die Qualität des Ergebnisses.

### Bewertung

Im nächsten Schritt erfolgt eine Bewertung der Individuen. Da die technischen Stufen für alle Perioden durch den Genetischen Algorithmus bereits vorgegeben sind, werden jetzt die Entscheidungsvariablen der zweiten Stufe für jedes Szenario einzeln durch einen MILP-Solver berechnet. Die Übergabe der Information über die technischen Stufen erfolgt dabei als Parameter, die in einer zusätzlichen Restriktion des Modells berücksichtigt werden. Aufgrund der relativ vollständigen Kompensationsfunktion des Modells ist es nicht zwingend erforderlich, dass die Erfüllung der Nachfrage für eine gegebene Erststufenentscheidung möglich ist. In diesem Fall entstehen Fehlmengen, die durch entsprechende Fehlmengenkosten eine Auswirkung auf den Zielfunktionswert haben.

Anhand der berechneten Kapitalwerte der einzelnen Szenarien ergibt sich anhand einer Gewichtung mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten der Erwartungswert des Kapitalwerts für die gegebenen Erststufenentscheidungen. Dieser Wert wird dann dem Individuum als Fitnesswert zugeordnet.

### Abbruchkriterium

Nachdem die Fitnesswert-Berechnung für alle Individuen stattgefunden hat, wird das Abbruchkriterium überprüft. Die Suche kann beispielsweise abgebrochen werden, wenn nach einer bestimmten Generationsanzahl keine Verbesserung mehr erzielt wurde, oder wenn eine maximale

Generationsanzahl erreicht wurde. Da das Abbruchkriterium einen direkten Einfluss auf die Laufzeit und Lösungsgüte hat, ist dieser Wert problemspezifisch anzupassen.

### Variation

Wurde das Abbruchkriterium nicht erfüllt, erfolgt im nächsten Schritt die Variation der Individuen. Dabei wurde auf die Rekombination verzichtet, d.h. Nachkommen werden nur durch Mutation einzelner Individuen erzeugt. Nachteilig an den Rekombinationsstrategien ist zu sehen, dass hier Reparaturmechanismen benötigt werden, um sicherzustellen, dass die erzeugten Lösungen gültig sind. Durch eine Beschränkung auf eine Mutation findet zwar eine Beschränkung auf vergleichsweise kleinere Sprünge statt, durch ausreichend große Populationen und angepasste Mutationsstrategien kann jedoch auch eine breite Suche im Lösungsraum ermöglicht werden.

Vor der Mutation werden zunächst  $\lambda$  Individuen aus einer Population zufällig ausgewählt. Diese Individuen werden anschließend durch eine der drei folgenden Mutationsstrategien variiert.

- Mutationsstrategie I: Wechsel der technischen Stufe (zufällige Auswahl)
- Mutationsstrategie II: Spätere Aktivierung des Wechsels der benutzten technischen Stufe
- Mutationsstrategie III: Frühere Aktivierung des Wechsels der benutzten technischen Stufe

Die Mutationsstrategien werden zufallsabhängig ausgewählt. Hierbei ist die Wahrscheinlichkeit für die Durchführung der Mutationsstrategie I am geringsten, da diese vergleichsweise große Veränderungen bewirkt.

Bei jeder Mutation wird zu dem Individuum die Information gespeichert, welche Mutationsstrategie angewendet wurde. Diese Information wird verwendet, um zu erreichen, dass ein Individuum nicht zweimal hintereinander mit derselben Strategie verändert oder rückgängig gemacht wird. Hierdurch wird eine breitere Suche nach Lösungen gewährleistet. Wurde eine Strategie bereits angewendet, so wird per Zufall eine andere ausgewählt.

Während der Mutation wird immer eine Zeile der Matrix betrachtet, die zufällig ausgewählt wird. Für die Veränderung mit den Mutationsstrategien II und III muss zusätzlich die Schrittweite der Verschiebung bekannt sein. Die Schrittweite ist die Anzahl der Perioden, um die der Aufbau einer Linie verschoben wird. Die maximale Schrittweite wird dabei abhängig von der Generation festgelegt und wird mit zunehmender Generationsanzahl immer weitere eingeschränkt. Dadurch werden zu einem frühen Zeitpunkt relativ große Sprünge innerhalb des Lösungsraums erlaubt, um lokalen Optima zu entkommen. Die Funktionsweise der drei Mutationsstrategien ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

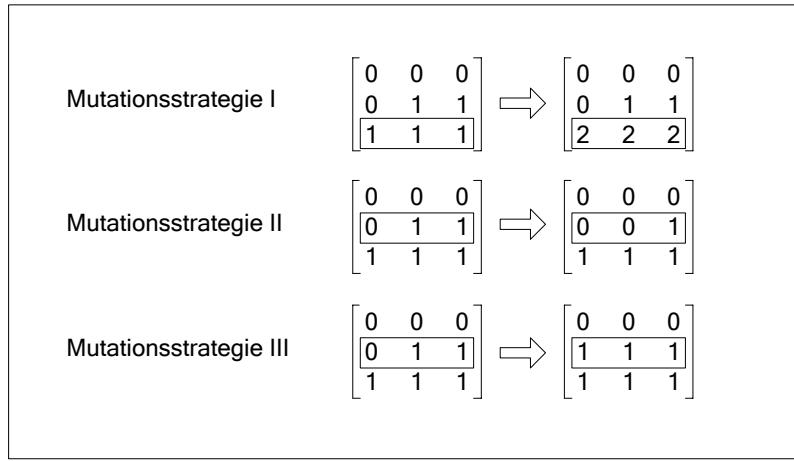


Abbildung 5.13: Funktion der Mutationsstrategien

Die Mutationsstrategie I geht so vor, dass der technische Zustand der ausgewählten Linie verändert wird. Dabei wird der neue technische Zustand aus den für diese Linie möglichen Zuständen zufällig ausgewählt. Bei dieser Strategie wird die Schrittweite nicht berücksichtigt.

Die Mutationsstrategie II dagegen führt eine Verschiebung des Wechsels nach hinten durch. Das bedeutet, dass der Wechsel der technischen Stufe um die durch die Schrittweite angegebene Periodenanzahl nach hinten verschoben wird.

Die Mutationsstrategie III arbeitet analog zu der zweiten, wobei der technische Wechsel um die durch die Schrittweite angegebene Periodenanzahl früher aktiviert wird.

### Selektion

Nachdem die  $\lambda$  mutierten Individuen bewertet wurden, findet die Selektion statt und die Eltern für die nächste Generation werden ausgewählt. Dazu werden aus den  $\mu + \lambda$  zur Verfügung stehenden Individuen einer Generation die  $\mu$  besten Individuen anhand des Fitnesswertes ausgewählt.

Der beschriebene Ablauf wird so lange wiederholt, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist und die beste gefundene Lösung ausgegeben wird. Als Abbruchkriterium kann beispielsweise die Laufzeit die Generationsanzahl verwendet werden. Eine genaue Darstellung des angepassten hybriden Algorithmus in Form eines Pseudocodes ist in Abbildung 5.14 dargestellt.

1	<b>AngepassterHybriderGenetischerAlgorithmus (<math>\mu, \lambda, \kappa</math>)</b>	
2	Generationsanzahl = 0	
3	Initialisiere die erste Population mit $\mu$ Individuen $P(t = 0) = I_1, I_2, \dots, I_\mu$	
4	Bewerte die Initialpopulation durch Optimierung des Modells der zweiten Stufe	
5	<b>for</b> $i = 1$ to $\mu$ <b>do</b>	
6	Alter[I] ++	
7	<b>end for</b>	
8	<b>while</b> (Abbruchkriterium nicht erfüllt) <b>do</b>	
9	Wähle $\lambda$ Kinder Individuen zufällig von den $\mu$ Eltern aus	
10	<b>for</b> $i = 1$ to $\lambda$ <b>do</b>	
11	Wähle per Zufall die zu mutierende Zeile aus	
12	/*Auswahl der zu verwendenden Mutationsstrategie*/	
13	Ermittle eine Zufallszahl zwischen 1 und 3	
14	<b>if</b> (Zufallszahl = 1)	
15	<b>Then</b> /*Verwende die Mutationsstrategie I*/	
16	Mutiere die Matrix $M(I_i)$ eines Individuums $I_i$	
17	<b>end if</b>	
18	<b>if</b> (Zufallszahl = 2)	
19	<b>then</b> /*Verwende die Mutationsstrategie II*/	
20	Mutiere die Matrix $M(I_i)$ eines Individuums $I_i$	
21	<b>end if</b>	
22	<b>if</b> (Zufallszahl = 3)	
23	<b>then</b> /*Verwende die Mutationsstrategie III*/	
24	Mutiere die Matrix $M(I_i)$ eines Individuums $I_i$	
25	<b>end if</b>	
26	Generiere eine Genom-Liste aus der mutierten Matrix	
27	Füge das Kind in die Population hinzu	
28	<b>end for</b>	
29	Bewerte die $\lambda$ Kinder durch Optimierung des Modells der zweiten Stufe	
30	<b>for</b> $i = 1$ to $\lambda$ <b>do</b>	
31	Alter[I] = 1	
32	<b>end for</b>	
33	Selektiere die $\mu$ besten Individuen von den $\lambda$ Kindern und den $\mu$ Eltern, wobei dessen Alter nicht die maximale Lebensdauer $\kappa$ überschreitet	
34	/*Erhöhe das Alter aller selektierten $\mu$ Individuen*/	
35	<b>for</b> $i = 1$ to $\mu$ <b>do</b>	
36	Alter[I] = Alter[I] + 1	
37	<b>end for</b>	
38	Generationsanzahl ++	
39	<b>end while</b>	
40	<b>end</b>	

Abbildung 5.14: Pseudocode des angepassten hybriden Genetischen Algorithmus für die Anpassungsplanung

## 6 Einbindung der Verfahren in ein Vorgehensmodell zur Planung von Fließproduktionssystemen in der Montage

Nachdem im vorangegangenen Kapitel Verfahren zur Strukturplanung entwickelt wurden, sollen diese in eine durchgängige Planungssystematik eingeordnet werden, die als Grundlage für die Planung mehrstufiger Fließproduktionssysteme dienen kann. Die Planungssystematik orientiert sich dabei an der generellen Vorgehensweise zur Planung von Montageanlagen, die bereits in Kapitel 2.2 vorgestellt wurde. Das allgemeine Vorgehensmodell ist dabei um die spezifischen Arbeitsschritte bei der Planung von Fließproduktionsliniensystemen in der Montage zu erweitern, die im Rahmen der Erläuterungen genauer beschrieben werden. Dabei werden folgende Prämissen verwendet:

- Systematik der Vorgehensweise entsprechend allgemein gültiger Ansätze<sup>154</sup>
- Einschränkung des Planungsgegenstandes auf Fließproduktionssysteme in der Montage
- Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Planungsphasen
- Integration der vorgestellten Verfahren zur Strukturierung aus Kapitel 5
- Integration von Ansätzen zur Beherrschung von Variantenvielfalt in getakteten Fließproduktionslinien

Insbesondere wird die konzeptionelle Phase innerhalb des Planungsablaufes betont, da hier mit Hilfe der neu vorgestellten Verfahren verbesserte Aussagen über die Effizienz des Systems gemacht werden können. Die neuen Verfahren sollen dabei in diese Phase eingebunden werden, ohne dass von der grundsätzlichen Vorgehensweise der Erstellung und Bewertung mehrerer Planungsalternativen abgewichen wird. Weiterhin wird auch ein Top-Down-Planungsansatz verfolgt, durch den eine Verfeinerung und Detaillierung des Montagesystems mit fortschreitender Planung erfolgt. Hierbei sind auch Rückmeldungen von nachfolgenden an übergeordnete Planungsphasen zu berücksichtigen, die eine Iteration des Planungsabschnittes erfordern.

Der generelle Planungsablauf ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Im Folgenden sollen die einzelnen Arbeitsschritte genauer beschrieben werden.

---

<sup>154</sup> Siehe dazu bspw. Bullinger (1995), S. 85ff.

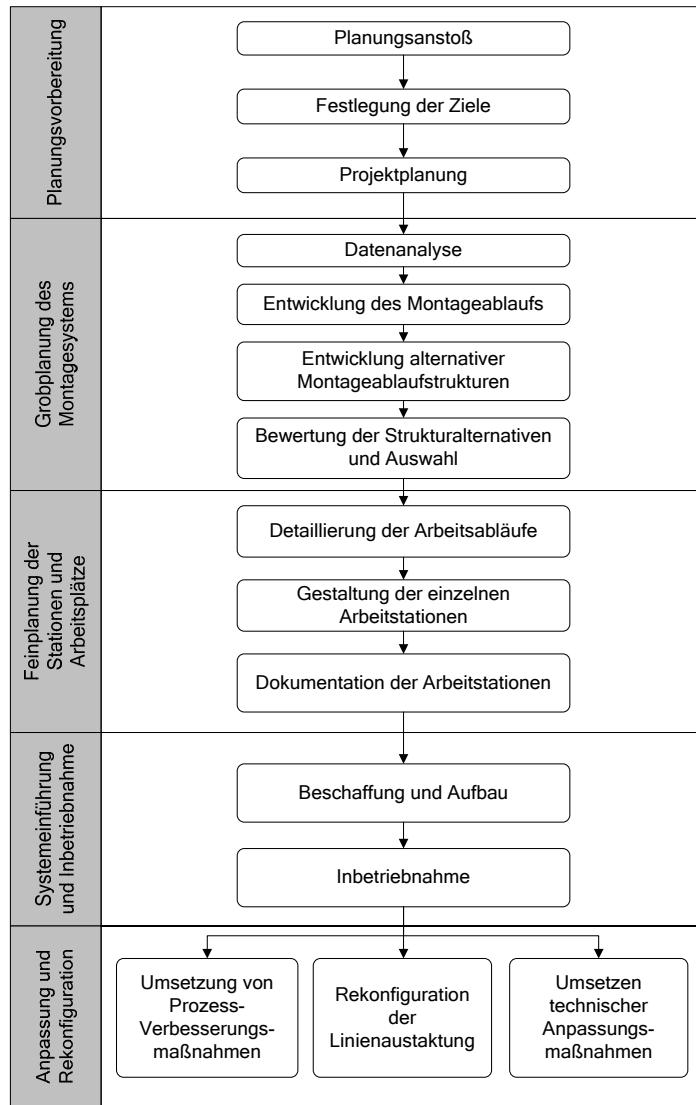


Abbildung 6.1: Vorgehensmodell zur Planung von Fließproduktionssystemen in der Montage

### Planungsvorbereitung

Aufgabe der Planungsvorbereitung ist die Eingrenzung und Beschreibung der Planungsaufgabe. Die Planungsvorbereitung kann in mehrere Schritte untergliedert werden:

- Planungsanstoß
  - Formulierung der Planungsaufgabe, Festlegen der Systemgrenzen
- Festlegung der Ziele
  - Definition der Ziele, Analyse der Zielabhängigkeiten, Identifikation und Gewichtung der Ziele
  - Durchführung einer Umfeld- und Risikoanalyse
  - Erstellung eines Pflichtenhefts
- Projektplanung
  - Erstellen eines Projektplans

- Festlegen der Verantwortlichen und Beteiligten
- Aufstellen eines Zeit- und Kostenplans, Festlegung von Projektabbruchkriterien

Den Abschluss der Planungsphase bildet die Verabschiedung der Planungsziele in Form eines Pflichtenheftes und die Beauftragung des Projektteams.

### Grobplanung

Innerhalb der Grobplanung wird die Struktur des Montagesystems geplant. Neben der Bewertung optimaler Strukturen auf Basis statischer Eingangsdaten hat hier auch eine Flexibilitätsplanung auf Basis unsicherer Eingangsdaten zu erfolgen. Generell gliedert sich die Strukturplanungsphase in drei Schritte:

- Datenanalyse
  - Erhebung der Produktdaten (CAD-Daten, Stücklisten, Teileeigenschaften, Montagetechnologien)
  - Erhebung der Marktdaten (Stückzahlprognosen, Kostensätze für Personal, Transport, Fläche etc.)
  - Ermittlung vorhandener Potenziale (Freiflächen, Altanlagen, Mitarbeiter)
- Entwicklung des Montageablaufs
  - Grobe Bestimmung von Montage- und Prüfvorgängen
  - Bestimmung der Fügeverfahren und Automatisierungspotenziale
  - Analyse der Auslagerung von Montageumfängen in Modulnebenlinien<sup>155</sup>
  - Erstellung alternativer Montageabfolgen, Bestimmung der Vorranggraphen und Montageabschnittszeiten
- Entwicklung alternativer Montagestrukturen
  - Entscheidung über offene oder geschlossene Stationsgrenzen auf Grundlage der ermittelten Zeitspreizungen
  - Festlegung der Kapazitätsteilung und Produktzuordnung (Einsatz der Verfahren aus Kapitel 5.1 und 5.2)
  - Flexibilitätsplanung: Untersuchung der Strukturalternativen auf Lieferfähigkeit bei unterschiedlichen Stückzahlszenarien, Festlegen der technischen Anpassungsstrategie bei unsicheren Stückzahlen (Einsatz des Verfahrens aus Kapitel 5.3)
  - Bestimmung Groblayout (Grobplanung des Materialflusses: Logistikflächen, Fördermittel, Puffer)

---

<sup>155</sup> Hier können Untersuchungen notwendig werden, die über das betrachtete Montagesystem hinausgehen. Dabei ist zu untersuchen, ob eine gemeinsame Nutzung der Modulmontagelinien mit anderen Produkten vorteilhaft ist.

- Bewertung der Strukturalternativen und Auswahl
  - Kennzahlen berechnen und Zielerfüllungsgrade der Alternativlösungen bestimmen
  - Nutzwertanalyse
  - Ergebnisaufbereitung und Systemauswahl

Ergebnis der Grobplanungsphase ist eine Beschreibung der Teilsysteme, die als Grundlage für die Feinplanung dient.

### Feinplanung der Stationen und Arbeitsplätze

Aufgabe der Feinplanungsphase ist es, die innerhalb der Grobplanung definierten Strukturelemente auszuplanen. Dabei werden die einzelnen Systemelemente weiter detailliert und konkretisiert.

- Konkretisierung der Arbeitsabläufe
  - Festlegung der Montagevorgänge, -technologie und -reihenfolge (Austaktung der Linien anhand der zugeordneten Produkte und Montageinhalte)
  - Feinplanung der Montageorganisation (Umfeldaufgaben, Mitarbeiterorganisation, Materialfluss, Pufferdimensionierung, Bestimmung der Fördermittel und Behälter)
- Gestaltung der einzelnen Arbeitsstationen
  - Entwicklung von alternativen Arbeitsplatzlayouts (Auswahl und Anordnung der Betriebsmittel, Bestimmung der Stationsabmaße, Bestimmung der Vorgabezeiten)
  - Bewertung und Auswahl der am besten geeigneten Arbeitsplatzalternative
- Dokumentation der Arbeitsplätze
  - Festlegen der günstigsten Feinstruktur, Erstellen des Feinlayouts
  - Beschreibung der Arbeitsstationen und des Montageablaufs

### Systemeinführung und Inbetriebnahme

Auf Grundlage der Beschreibung des Montagesystems kann der Aufbau des Fließproduktionssystems beauftragt werden. Die Aufgaben während der Inbetriebnahme lassen sich zwei Bereichen zuordnen:

- Beschaffung der Betriebsmittel und Aufbau (Beauftragung der Lieferanten, Planung und Kontrolle des Aufbaus)
- Inbetriebnahme der Linien (Schulung der Mitarbeiter, Planung des Produktionsanlaufs, Test der Anlagen, Beseitigung von Fehlerursachen)

### Anpassung und Rekonfiguration

Auch nach der Inbetriebnahme sind weiterhin strukturrelevante Planungsaufgaben zu erfüllen. Ursache hierfür sind Stückzahländerungen, Änderungen an den Produkten sowie Änderungen an den Montageprozessen in Folge von Verbesserungsmaßnahmen. Damit ergeben sich folgende Planungsbereiche:

- Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen des Montageprozesses
  - Anpassung der Montageabläufe
  - Anpassung der Montagevorgabezeiten
- Rekonfiguration der Linienaustaktung aufgrund vom Auslegungszustand abweichender Bauraten
  - Anpassung an veränderte Bauraten der zukünftigen Kundenaufträge
  - Kurzfristige Anpassung an verblockte Produktionsprogramme<sup>156</sup>
- Umsetzen technischer Anpassungsmaßnahmen in Folge technischer Entwicklungen und Produktänderungen

Die Planungssystematik unterstützt die technische Gestaltung des Fließproduktionsliniensystems. Im Sinne einer hierarchischen Planung werden so die Voraussetzungen für das eigentliche Produktionsgeschehen gebildet. Während des Betriebes sind dann Planungsaufgaben zu leisten, die der operativen Produktionsplanung und -steuerung zugeordnet werden können. Hierzu gehören die Auftragsannahme und -einplanung, die Personalkapazitätsplanung sowie die Planung der logistischen Prozesse. Bei offenen Stationsgrenzen muss zusätzlich auch eine Reihenfolgeplanung erfolgen.

---

<sup>156</sup> Unter Verblockung wird hier die Zusammenfassung ähnlicher Produktionsaufträge verstanden, bspw. die Produktion aller Cabrio Fahrzeuge in einem Los.

## 7 Validierung der Verfahren an Beispielen

### 7.1 Beispiel für eine Neuplanung bei geschlossenen Stationsgrenzen

Das in Kapitel 5.1 entwickelte Verfahren zur Neuplanung von Fließproduktionslinien wird im Folgenden im Rahmen eines Fallbeispiels angewendet. Das Modell wurde dabei in einer kommerziellen Software zur Lösung von mathematischen Problemen abgebildet und zur Datenaufbereitung und Ergebnisanalyse an eine Datenbank angebunden. Als Beispiel dient hierbei die Planung eines Montagesystems für LKW-Motoren. Ziel ist dabei die Ermittlung einer kostenoptimalen Systemteilung für ein gegebenes Produktionsprogramm.

#### 7.1.1 Eingangsdaten

Grundlage für die Planung bildet die Analyse der Produktdaten. Für die Strukturplanung ist es dabei zunächst nicht notwendig, jede mögliche Produktvariante detailliert abzubilden. Durch eine geeignete Analyse werden Produktvarianten identifiziert, die durch ihre Montageeigenschaften als Repräsentant für eine Gruppe von Varianten geeignet sind. Innerhalb einer Gruppe sollten dies „Maximalvarianten“ sein, also Varianten, die in allen Ausprägungen die größten Anforderungen haben, um so sicherzustellen, dass auch alle anderen Varianten dieser Gruppe auf der Linie gebaut werden können, auf die der Repräsentant zugeordnet wurde. Insbesondere Exoten sollten hier gesondert abgebildet werden, wenn diese in den Eigenschaften stark von den Standard-Varianten abweichen.

Aus den vorangegangenen Planungsschritten sind für diese Repräsentanten folgende Informationen für die Strukturplanung abzuleiten und aufzubereiten:

- die Produktionsmengen der Produktvarianten
- die Arbeitsvorgänge und deren Bearbeitungszeiten
- die für die Arbeitsvorgänge benötigten Betriebsmittel (technische Ressourcen)

Da die grobe Bestimmung der Stationsanzahl einer Linie und damit der einzusetzenden Arbeitskräfte wie in Kapitel 5.1 gezeigt auf Basis der Montageabschnitte erfolgen kann, ist keine explizite Erarbeitung eines vollständigen Montagevorranggraphens notwendig. Durch Erstellen einer gültigen Montagereihenfolge kann bereits eine Aussage über die Bildung von Montageabschnitten und den jeweils enthaltenen Montagevorgängen gemacht werden. Erst beim weiteren Vorgehen sind dann im Rahmen der Austaktung der einzelnen Produktionslinien detailliertere Aussagen zu Vertauschungsmöglichkeiten der Montagevorgänge zwischen den Stationen notwendig.

Für das vorliegende Beispiel werden vier Produktvarianten betrachtet, für die die benötigten Arbeitsvorgänge und benötigte Ressourcen in Tabelle 7.1 abgebildet sind. Die Arbeitsvorgänge sind bereits unter Einhaltung der Vorrangsfolge bestimmten Montageabschnitten zugeordnet worden, so dass jede technische Ressource damit eindeutig einem Abschnitt zugeordnet ist

(Tabelle 7.2). Hierbei ist zu beachten, dass die Arbeitsvorgänge je nach Variante unterschiedliche Ausprägungen haben können oder bei bestimmten Varianten auch gar nicht durchgeführt werden müssen.

Arbeitsvorgang	Produktvariante V1		Produktvariante V2		Produktvariante V3		Produktvariante V4	
	Bedarf	Ressource	Bedarf	Ressource	Bedarf	Ressource	Bedarf	Ressource
AV 01	•	Mehrfachschrauber 1	•	Mehrfachschrauber 1	•	Galgenschwenkkran 1	•	Galgenschwenkkran 1
AV 02	•	Galgenschwenkkran 1	•	Galgenschwenkkran 1				
AV 05	•	Manipulator 1	•	Manipulator 1				
AV 06	•	Galgenschwenkkran 2	•	Galgenschwenkkran 2	•	Manipulator 2	•	Manipulator 2
AV 10					•	Mehrfachschrauber 2	•	Mehrfachschrauber 2
AV 11			•	Galgenschwenkkran 3				
AV 15	•	Manipulator 3			•	Manipulator 3	•	Galgenschwenkkran 3
AV 16					•	Mehrfachschrauber 4		
AV 19	•	Mehrfachschrauber 4	•	Manipulator 4			•	Manipulator 4

Tabelle 7.1: Ressourcenbedarfe der Produktvarianten

Arbeitsvorgang	Montageabschnitt	Ressourcen im Montageabschnitt
AV 01		Mehrfachschrauber 1
...		Galgenschwenkkran 1
AV 05	1	Manipulator 1
AV 06		Mehrfachschrauber 2
...		Galgenschwenkkran 2
AV 10	2	Manipulator 2
AV 11		Galgenschwenkkran 3
...		Manipulator 3
AV 15	3	
AV 16		Mehrfachschrauber 4
...		Manipulator 4
AV 20	4	

Tabelle 7.2: Zuordnung der technischen Ressourcen zu Montageabschnitten

Für jede Produktvariante werden die Montageabschnittszeiten anhand der Vorgabezeiten der enthaltenen Arbeitsvorgänge bestimmt (Tabelle 7.3). Im Anschluss an die Strukturplanung müssen diese groben Abschnittszeiten dann wieder in einzelne Arbeitsvorgänge aufgelöst werden, um eine effiziente Austaktung erreichen zu können.

Produktvariante		Montageabschnittzeiten [ZE]			
		MA 1	MA 2	MA 3	MA 4
PV 1		4,7	5,3	5,9	5,8
PV 2		5,0	4,8	9,7	10,1
PV 3		9,6	10,1	6,0	6,1
PV 4		9,8	9,8	9,9	9,9

Tabelle 7.3: Montageabschnittszeiten der Produktvarianten

Bei der Berücksichtigung der technischen Ressourcen sollten alle Betriebsmittel und Werkzeuge aufgelistet werden, die aufgrund ihres Investitionsbedarfes entscheidungsrelevant sind. Für das Fallbeispiel sind diese Informationen in Tabelle 7.4 aufgeführt.

Technische Ressource	Montage-abschnitt	Investitions-kosten [GE]
Mehrachsenschrauber 1	1	215.000
Mehrachsenschrauber 2	2	230.000
Mehrachsenschrauber 4	4	200.000
Galgenschwenkkran 1	1	7.000
Galgenschwenkkran 2	2	9.000
Galgenschwenkkran 3	3	5.000
Manipulator 1	1	18.000
Manipulator 2	2	15.000
Manipulator 3	3	17.000
Manipulator 4	4	16.000

Tabelle 7.4: Investitionskosten der technischen Ressourcen

Um zu berücksichtigen, dass bei der Errichtung paralleler Linien zusätzliche Kosten für Steuerungseinrichtungen und Anlagen zum Auf- und Ablegen der Werkstückträger anfallen, werden diese als Linienerrichtungskosten zusammengefasst. Beim Auf trennen der Produktionslinien in Vor- und Endmontage fallen weitere Kosten für die Installation der zusätzlichen Fördertechnik an, siehe Tabelle 7.5.

Kostenbezeichnung	Kosten [GE]
Investitionskosten je Montagelinie	750.000
Investitionskosten je Montagestation	57.300
Investitionskosten für zusätzliche Fördertechnik zwischen Vor- und Endmontage	100.000

Tabelle 7.5: Investitionskosten für den Linienaufbau

Des Weiteren sind die Produktionsmengen für jede Produktvariante für einen definierten Zeitraum (hier: ein Jahr) zu prognostizieren und als Eingangsparameter für das Modell auf eine Tagesproduktionsmenge umzurechnen. Dabei werden für ein Jahr 220 Arbeitstage angenommen. Die Produktionsmenge aller Produktvarianten ist im Fallbeispiel gleich, siehe Tabelle 7.6.

Produkt-varianten	Jahresproduktions-menge [ME]		Tagesproduktions-menge [ME]
	PV 1	13.200	
	PV 2	13.200	60
	PV 3	13.200	60
	PV 4	13.200	60

Tabelle 7.6: Übersicht der Produktionsmengen

Zur Anpassung der organisatorischen Kapazität stehen maximal 3 Schichten pro Tag zur Verfügung, wobei jede Schicht ein Zeitangebot 480 Zeiteinheiten hat (siehe Tabelle 7.7). Die Personalkosten sind dabei für jedes Schichtmodell unterschiedlich, so dass auch Sonderzuschläge für die Spät- und Nachschichten berücksichtigt sind.

Schichtmodell	Schichtanzahl	Kapazitätsangebot [ZE]	durchschn. Personalkosten je ZE und Arbeitskraft [GE/ZE*AK]
1-schichtig	1	480	0,6
2-schichtig	2	960	0,7
3-schichtig	3	1.440	0,9

Tabelle 7.7: Schichtmodellparameter des Fallbeispiels

Die maximale Anzahl möglicher Arbeitsstationen wird durch die zur Verfügung stehende Produktionsfläche bestimmt. Anhand der vorgegebenen Maße für die Gangbreite zwischen den Montagelinien, der Breite für die logistische Bereitstellfläche, der Breite und Länge jeder Station sowie der Produktionsfläche lässt sich die Stationsanzahl bestimmen (siehe Kapitel 5.1). Für das vorliegende Beispiel wird von einer maximalen Stationsanzahl  $S^{\max} = 36$  ausgegangen.

Um die Funktionsweise des Verfahrens darzustellen, werden in zwei Versuchsreihen die Effekte der Kapazitätsteilung auf die Effizienz nachgewiesen. In der ersten Versuchsreihe soll geprüft werden, ob eine Aufteilung der Montagelinie in mehrere parallele Linien eine Effizienzsteigerung bewirkt. In der zweiten Versuchsreihe findet eine gleichzeitige Betrachtung von horizontaler und vertikaler Teilung statt. Die untersuchten Strukturalternativen sind in dargestellt.

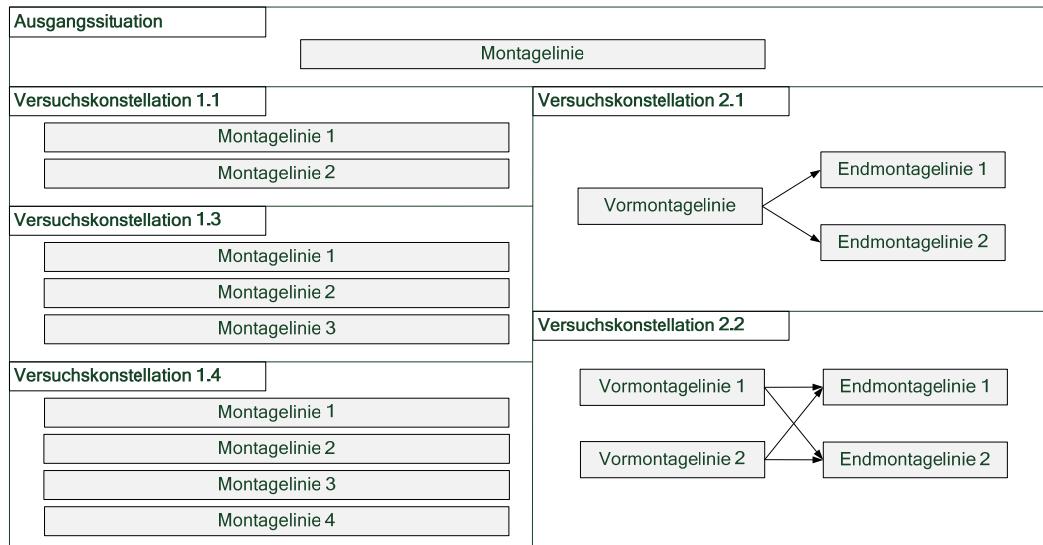


Abbildung 7.1: Montagestrukturen der durchgeführten Versuchsreihen

Aus arbeitswissenschaftlicher Gründen werden für die Versuchsreihen minimale Takte vorgegeben, die in Tabelle 7.8 angegeben sind.

Versuchsreihe	Strukturname	Montagebereich	Linie	Minimaler Takt [ZE]
1	1.1		ML1	2
	1.2		ML1	4
			ML2	4
	1.3		ML1	4
			ML2	4
			ML3	4
	1.4		ML1	8
			ML2	8
			ML3	8
			ML4	8
2	2.1	Vormontage	VML1	2
		Endmontage	EML1	4
			EML2	4
	2.2	Vormontage	ML1	4
			ML2	4
		Endmontage	ML3	4
			ML1	4

Tabelle 7.8: Minimaltaktzeiten für die Versuchsreihen

Zusätzlich zu den Kosten werden bei den Untersuchungen noch weitere Kenngrößen angegeben. Ein Vergleich der alternativen Strukturkonzepte erfolgt hinsichtlich der Auslastung mittels des Nutzungsgrades  $N^{System}$  des Gesamtsystems. Dieser ist als Verhältnis von Gesamtkapazitätsbedarf und Gesamtkapazitätsangebot definiert. Anhand der in Kapitel 5.1 eingeführten Parameter kann dieser wie folgt berechnet werden:

$$N^{System} = \frac{\sum_{v \in V} \sum_{a \in A} B_v \cdot T_{v,a}}{\sum_{l \in L} \sum_{q \in Q} K^{Schicht} \cdot s_l \cdot O_q \cdot z_{l,q}} \quad \text{Gl. 7.1-1}$$

Ebenso kann der Nutzungsgrad auf eine einzelne Montagelinie bezogen angegeben werden. Dieser Bandnutzungsgrad  $N_l^{Band}$  muss im Mehrproduktfall anhand der zugeordneten Produktionsmengen gewichtet werden.

$$N_l^{Band} = \frac{\sum_{v \in V} \sum_{a \in A} T_{v,a} \cdot p_{v,l}}{\sum_{v \in V} c_l \cdot s_l \cdot p_{v,l}} \quad \text{Gl. 7.1-2}$$

Damit können für die zu untersuchenden Montagestrukturen der beiden Versuchsreihen jeweils die optimale Parameterkonstellation bestimmt und relevante Kenngrößen gegenübergestellt werden:

Zuordnung der Produktvarianten zu den Montagelinien

Zuordnung der Ressourcen zu den Montagelinien

Stationsanzahl je Montagelinie / Gesamtsystem

Zeitspreizungen/Taktausgleichsverluste

Kosten

Auslastungsgrade

### 7.1.2 Ergebnisse

Bei der Analyse der Zeitspreizungen in den einzelnen Montageabschnitten kann in der Ausgangssituation (nur eine Montagelinie) eine Differenz zwischen höchster und niedrigster Zeit festgestellt werden. Der geringe gewichtete Bandnutzungsgrad von 76,63 % resultiert aus der niedrigen Taktausnutzung der Produktvarianten 1 bis 3. Der sich durch die Optimierungsrechnung ergebende Takt von 2 Minuten im Einschichtbetrieb wird nur von der Produktvariante 4 gut ausgenutzt, während alle anderen Varianten die Stationen nur sehr schlecht ausnutzen. Daraus wird im Folgenden der optimale Grad der Kapazitätsteilung bestimmt.

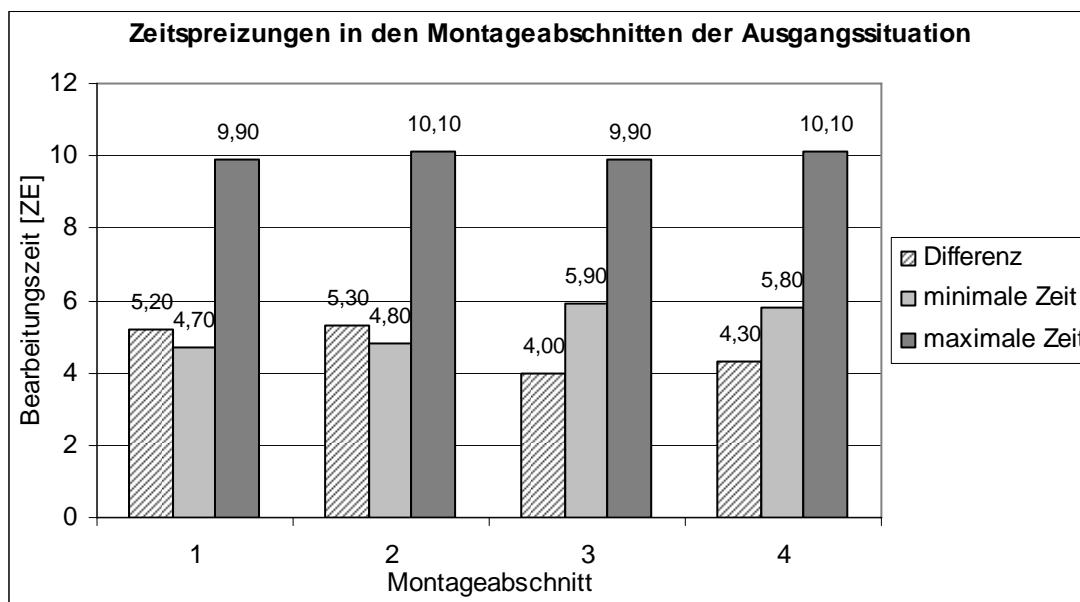


Abbildung 7.2: Vergleich der Zeitspreizungen der Ausgangssituation (eine Montagelinie)

Durch die zunehmende Kapazitätsteilung in den untersuchten Montagestrukturen der Versuchsreihe 1 lässt sich der Montagesystemnutzungsgrad auf 95,78 % steigern (siehe Abbildung 7.3). Dies liegt daran, dass mit zunehmenden Teilungsgrad geringere Zeitspreizungen auftreten und somit die Linien besser ausgetaktet werden können. Entsprechend steigen auch die gewichteten Bandnutzungsgrade (siehe Tabelle 7.9).

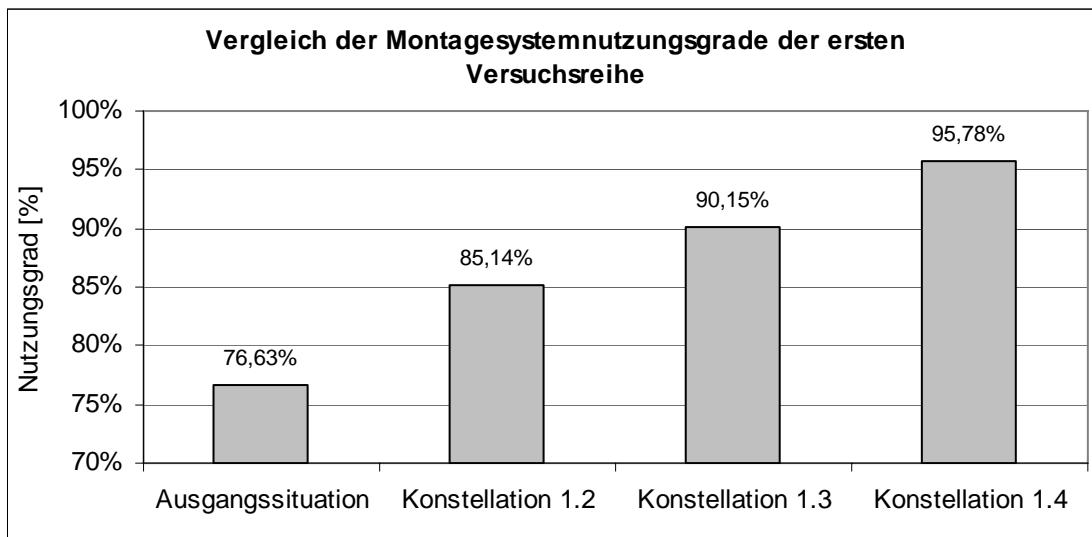


Abbildung 7.3: Vergleich der Montagesystemnutzungsgrade der Versuchreihe 1

Montagelinienbezeichnung	Produktvariante/Linienzuordnung				Anzahl der Stationen	Gesamtproduktionsmenge [E]	gewichteter Bandwirkungsgrad
	PV1	PV2	PV3	PV4			
Ausgangssituation	ML1	•	•	•	20	240	76,63%
Struktur 1.2	ML1	•	•		8	120	80,16%
	ML2		•	•	10	120	89,13%
Struktur 1.3	ML1	•			3	60	90,42%
	ML2		•		4	60	92,50%
	ML3		•	•	10	120	89,13%
Struktur 1.4	ML1		•		4	60	92,50%
	ML2	•			3	60	90,42%
	ML3			•	5	60	98,75%
	ML4		•		4	60	99,38%

Tabelle 7.9: Übersicht über die Produktvariantenzuordnung für Versuchsreihe 1

Zu beachten ist, dass mit steigender Anzahl paralleler Systeme die Anzahl gleichzeitig zu beschaffender Ressourcen steigt, da diese nun nicht mehr gleichzeitig genutzt werden. Der steigende Ressourcenbedarf ist Tabelle 7.10 zu entnehmen.

		Mehrachschauber 1	Mehrachschauber 2	Mehrachschauber 4	Galgenschwenkkran 1	Galgenschwenkkran 2	Galgenschwenkkran 3	Manipulator 1	Manipulator 2	Manipulator 3	Manipulator 4
Ausgangssituation	ML1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Anzahl Ressourcen		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Konstellation 1.2	ML1	•		•	•	•	•		•	•	
	ML2		•	•	•		•		•	•	•
Anzahl Ressourcen		1	1	2	2	1	2	1	1	2	2
Konstellation 1.3	ML1	•		•	•	•		•		•	
	ML2	•			•	•	•	•			•
	ML3		•	•	•		•		•	•	•
Anzahl Ressourcen		2	1	2	3	2	2	2	1	2	2
Konstellation 1.4	ML1	•			•	•	•	•			•
	ML2	•			•	•		•		•	
	ML3		•		•		•		•		•
	ML4		•	•	•				•	•	
Anzahl Ressourcen		2	2	2	4	2	2	2	2	2	2

Tabelle 7.10: Ergebnisse der technischen Ressourcenzuordnung der Versuchsreihe 1

Eine Betrachtung der Investitionskosten zeigt, dass mit steigender Anzahl paralleler Systeme die Investitionskosten für Ressourcen und die Einrichtung der Linien steigen, während die Kosten für Montagestationen und Personalkosten sinken (siehe Tabelle 7.11).

	Ausgangssituation	Struktur 1.2	Struktur 1.3	Struktur 1.4
Gesamtinvestitionskosten [GE]	2.628.000	3.508.400	4.450.100	5.394.800
Investitionskosten für Montagelinien [GE]	750.000	1.500.000	2.250.000	3.000.000
Investitionskosten für Montagestationen [GE]	1.146.000	1.031.400	974.100	916.800
Investitionskosten für Ressourcen [GE]	732.000	977.000	1.226.000	1.478.000
Personalkosten [GE/a]	1.267.200	1.140.480	1.077.120	1.013.700

Tabelle 7.11: Übersicht der Gesamtinvestitionskostenergebnisse der Versuchsreihe 1

In der zweiten Versuchsreihe wird zusätzlich zur horizontalen Teilung gleichzeitig die vertikale Teilung untersucht. Aufgrund der vier Montageabschnitte im Fallbeispiel ergeben sich drei Möglichkeiten zur Festlegung des Trennungspunktes. Die Entscheidung über die Zuordnung der Produktvarianten und Ressourcen erfolgt dabei anhand des in Kapitel 5.1 entwickelten Modells, deren Ergebnisse Tabelle 7.12 und Tabelle 7.13 dargestellt sind. Eine Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass sich durch die Montagestruktur 2.1 zwar eine Verbesserung gegenüber der Ausgangssituation ergibt, jedoch nur eine geringere Steigerung gegenüber der rein horizontalen Teilung aus Versuchsreihe 1 erreicht werden kann. Mit der Einführung einer zweiten Vormontagelinie in der Struktur 2.2 wird dagegen eine deutliche Verbesserung des Montagesystemnutzungsgrades möglich (siehe Abbildung 7.4).

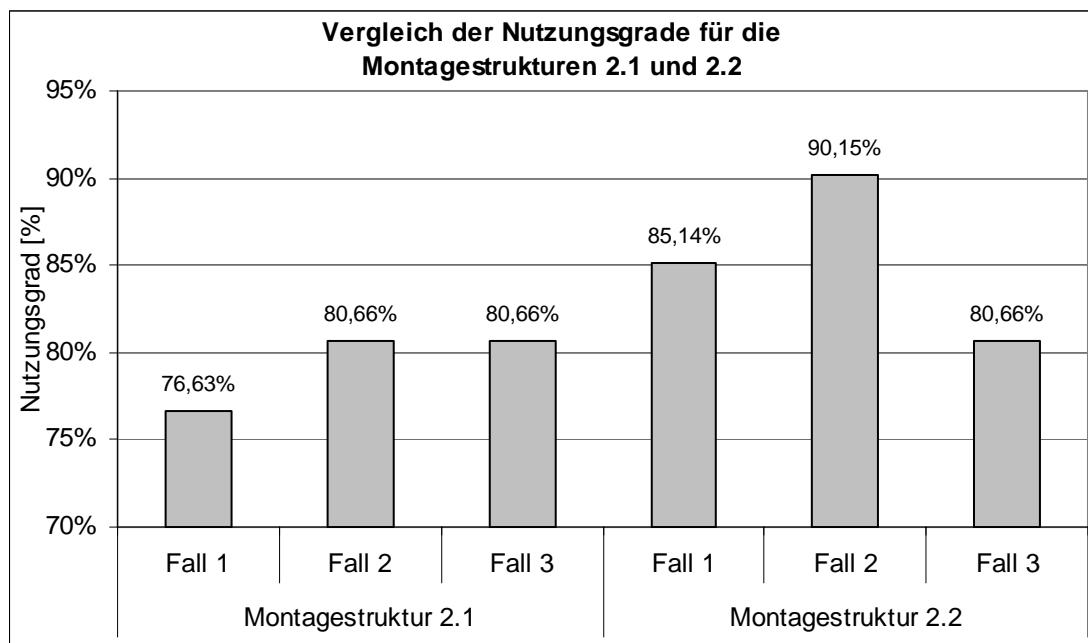


Abbildung 7.4: Vergleich der Montagesystemnutzungsgrade der Versuchreihe 2

Dem höheren Nutzungsgrad der Struktur 2.2 steht jedoch der Aufbau einer höheren Ressourcenanzahl gegenüber. Für die Strukturalternative 2.1 mit nur einer Montagelinie werden beispielsweise im Fall 2 nur wenige Ressourcen mehr benötigt als in der Ausgangssituation, so dass eine abschließende Bewertung erst anhand der Kosten erfolgen kann. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass bei einer Aufspaltung der Vormontagelinie die gewichteten Bandnutzungsgrade ansteigen (siehe Tabelle 7.12). Dies erklärt sich durch die gefundenen Produktvariantenzuordnungen, die zu einer erheblichen Verringerung der Zeitspreizungen führen (siehe Abbildung 7.5).

Montagestruktur 2.1		Montagelinienbezeichnung	Montageabschnitte				Linien/Produktvariantenzuordnung				Anzahl der Stationen	Gesamtproduktionsmenge [E]	gewichteter Bandnutzungsgrad
			1	2	3	4	PV1	PV2	PV3	PV4			
			•	•	•	•	•	•	•	•			
Fall 1	Fall 1	VML1	•				•	•	•	•	15	240	75,58%
		EML1		•	•	•		•		•	2	120	74,38%
		EML2		•	•	•	•		•		3	120	83,33%
	Fall 2	VML1	•	•			•	•	•	•	10	240	74,00%
		EML1			•	•		•		•	5	120	99,00%
		EML2			•	•	•		•		4	120	74,38%
Fall 2	Fall 3	VML1	•	•	•		•	•	•	•	5	240	73,00%
		EML1				•	•		•		8	120	84,69%
		EML2				•	•		•		6	120	81,67%
	Fall 1	VML1	•				•	•			8	120	86,41%
		VML2	•						•	•	5	120	88,51%
		EML1		•	•	•		•		•	2	120	74,38%
	Fall 2	EML2		•	•	•	•		•		3	120	83,38%
		VML1	•	•			•	•			5	120	98,50%
		VML2	•	•					•	•	3	120	82,50%
Fall 3	Fall 1	EML1			•	•		•		•	5	120	99,00%
		EML2			•	•	•		•		4	120	74,38%
		VML1	•	•	•		•	•			3	120	81,25%
		VML2	•	•	•				•	•	2	120	60,63%
	Fall 2	EML1				•	•		•		8	120	84,69%
		EML2				•	•		•		6	120	81,67%

Tabelle 7.12: Übersicht über die Produktvariantenzuordnung für Versuchsreihe 2

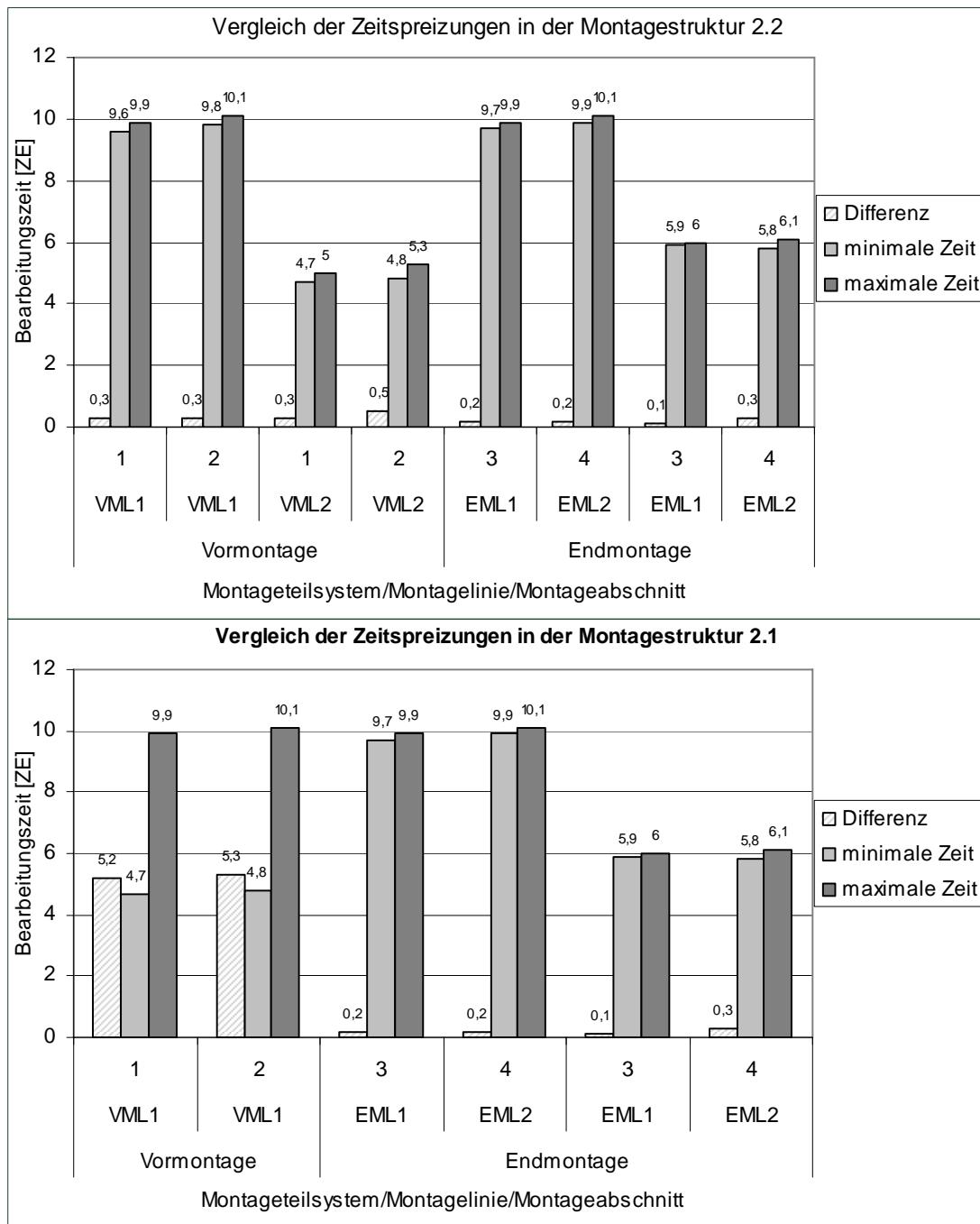


Abbildung 7.5: Vergleich der Zeitspreizungen der Montagestrukturen der Versuchsreihe 2 (Fall 2)

Bei der Betrachtung der Gesamtinvestitionskosten ist festzustellen, dass die Fixkosten für die Montagestrukturen der Versuchsreihe 2 über denen der Ausgangssituation liegen, da hier höhere Kosten für die Montagetechnik anfallen. Aufgrund des gestiegenen Nutzungsgrads ergibt sich jedoch ein Einsparpotenzial durch die gesunkenen Personalkosten.

Wird angenommen, dass das Produktionsprogramm über mehrere Jahre relativ konstant bleibt, kann die Vorteilhaftigkeit der Strukturalternativen anhand des Kostenverlaufs bestimmt werden. Hierbei ergibt sich, dass die Montagestruktur 2.2 (Fall 2) aufgrund der niedrigeren Personalkosten bereits nach etwa 3,6 Jahren vorteilhaft gegenüber der Ausgangssituation ist, während die

Montagestruktur 2.1 (Fall 2) diese Vorteilhaftigkeit erst nach 6,6 Jahren erreicht. Die Entscheidung sollte aus Kostensicht somit für die Montagestruktur 2.2 fallen.

		Investitionskosten [GE]					Personal-kosten [GE/a]
		Gesamt	Montage-linien	Montage-stationen	Ressourcen	Auftrennungskosten	
Montagestruktur 2.1	Fall 1	3.299.700	1.125.000	1.088.700	986.000	100.000	1.203.840
	Fall 2	3.045.700	1.125.000	1.088.700	732.000	100.000	1.203.840
	Fall 3	3.103.000	1.125.000	1.146.000	732.000	100.000	1.267.200
Montagestruktur 2.2	Fall 1	3.681.700	1.500.000	1.088.700	993.000	100.000	1.203.840
	Fall 2	3.313.100	1.500.000	974.100	739.000	100.000	1.077.120
	Fall 3	3.392.400	1.500.000	1.031.400	761.000	100.000	1.140.480
Ausgangssituation		2.628.000	750.000	1.146.000	732.000	-	1.267.200

Tabelle 7.13: Kostenvergleich der Versuchsreihe 2 mit der Ausgangssituation

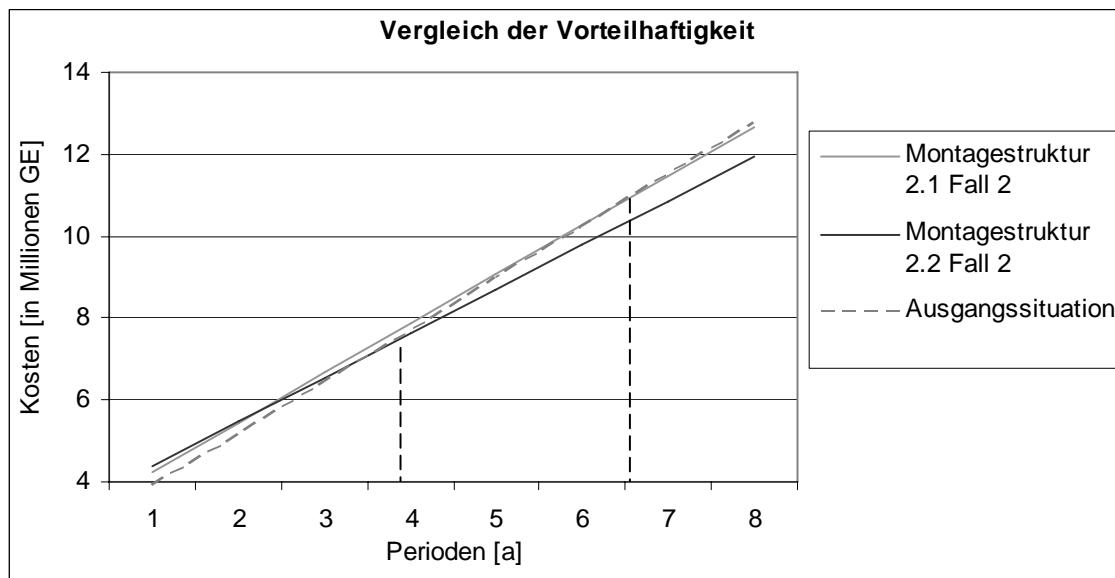


Abbildung 7.6: Vergleich der Vorteilhaftigkeit alternativer Strukturalternativen

## 7.2 Beispiel für eine Neuplanung bei offenen Stationsgrenzen

In diesem Abschnitt soll die Funktionsfähigkeit der in Kapitel 5.2 entwickelten Planeralgorithmen nachgewiesen werden. Im Fall von Montagesystemen mit Fließproduktionslinien mit offenen Stationsgrenzen werden durch die Algorithmen Aufträge so auf parallele Produktionslinien zugeordnet, dass eine Minimierung der auf den einzelnen Linien auftretenden Varianz der Bearbeitungszeiten stattfindet. Die Algorithmen wurden hierzu in Form eines Java-Programms implementiert und auf gegebene Auftragsdateien angewendet. Zunächst soll die Funktionsfähigkeit des modifizierten *k*-means-Algorithmus für die Auftragszuordnung ohne Ressourcenbeschränkungen nachgewiesen werden. Anschließend erfolgt die Anwendung des Algorithmus für Produktionslinien mit Ressourceneinschränkungen.

### 7.2.1 Auftragszuordnung ohne Ressourceneinschränkungen

Der Algorithmus zur Auftragszuordnung ohne Ressourceneinschränkungen soll für unterschiedliche Einstellungsoptionen untersucht werden. Die verwendete Eingangsdatei enthält 360 Aufträge mit jeweils 162 Montageabschnittszeiten, die aus Gründen der Vergleichbarkeit für alle folgenden Experimente verwendet wurde. Zur Bewertung der Güte der Lösungen wird der durchschnittliche F-Wert über alle Cluster ( $F^{gesamt}$ ) verwendet, durch den die Varianz der gefundenen Lösung zur Varianz der Ausgangsdaten in Beziehung gesetzt wird. Der F-Wert bezüglich einer Variable und eines Clusters ist dabei wie folgt definiert:<sup>157</sup>

$$F_{a,c} = \frac{V(a,c)}{V(j)} \quad \text{Gl. 7.2-1}$$

$F_{j,c}$	F-Wert der Montageabschnittszeiten in Montageabschnitt $a$ in Cluster $c$
$A$	Menge der Montageabschnitte
$C$	Menge der Cluster
$a$	Index der Montageabschnitte, mit $a \in A$ und $a = 1, \dots, N$
$c$	Index der Montageabschnitte, mit $c \in C$ und $c = 1, \dots, M$
$V(a,c)$	Varianz der Montageabschnittszeiten in Montageabschnitt $a$ in Cluster $c$
$V(a)$	Varianz der Montageabschnittszeiten in Montageabschnitt $a$ in Grundgesamtheit

Der F-Wert gibt den Grad der Homogenität innerhalb der einzelnen Cluster an. Liegt der F-Wert für eine Variable über eins ( $F_{a,c} > 1$ ), dann liegt in dem Cluster für diese Variable eine höhere Streuung vor als in der Grundgesamtheit und der Cluster ist in Hinblick auf diese Variable nicht homogen. Liegt der F-Wert für eine Variable unter eins ( $F_{a,c} < 1$ ), dann ist die Streuung dieser Variable in dem Cluster geringer als in der Grundgesamtheit und der Cluster ist hinsichtlich dieser Variable homogen. Gute Lösungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie für viele Variablen F-Werte unter eins erzeugen. Die Berechnung des durchschnittlichen F-Wertes  $F^{gesamt}$  erfolgt anschließend durch eine Mittelwertberechnung über alle Variablen und Cluster:

$$F^{gesamt} = \frac{\sum_{a \in A} \sum_{c \in C} F_{a,c}}{N \cdot M} \quad \text{Gl. 7.2-2}$$

Ein wichtiger Parameter bei der Anwendung des  $k$ -means-Algorithmus, der die Grundlage für den entwickelten Algorithmus bildet, ist die Auswahl der Initial-Clusterzentren, da diese einen

---

<sup>157</sup> Siehe Backhaus et al. (2006), S. 545ff.

entscheidenden Einfluss auf die Lösungsgüte haben. Daher wurden Versuchsreihen mit folgenden Vorgaben durchgeführt:

- Eine Ausführung des Algorithmus mit systematischer Wahl der Initial-Clusterzentren anhand der Gesamtbearbeitungszeit der Aufträge (siehe Kap 5.2)
- Jeweils 20 Ausführungen des Algorithmus mit zufälliger Auswahl der Initial-Clusterzentren

In Tabelle 7.14 sind die Ergebnisse der Versuchsreihen für unterschiedliche Clusterzahlen dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich die Lösungsgüte mit zunehmender Clusteranzahl verbessert. Dies gilt sowohl für die systematische als auch die zufällige Auswahl der Initial-Clusterzentren. Bei der Aufteilung der Kundenaufträge in zwei Cluster ist eine Reduzierung der durchschnittlichen Gesamtvarianz um 13% möglich, während durch eine Teilung in zwölf Cluster sogar eine Reduzierung um 60% möglich ist.

Eine Ausnahme bildet das Ergebnis bei systematischer Auswahl für die Clusterzahl  $k=4$ . Dies kann auf die Auswahl der Clusterzentren nur in Abhängigkeit der Gesamtarbeitszeiten der Aufträge zurückgeführt werden. Dennoch liegt auch hier der Wert unter dem mittleren Wert der beobachteten Lösungsgüten bei zufälliger Auswahl.

Anzahl der Cluster (k)	F-Wert der gesamten Partition nach Auswahlmethode der Initial-Clusterzentren			
	systematisch	zufällig (Ergebnisse nach 20 Ausführungen des Algorithmus)		
		bester Wert	mittlerer Wert	schlechtester Wert
2	0,87	0,87	0,87	0,87
3	0,76	0,75	0,79	0,86
4	0,78	0,74	0,79	0,82
5	0,74	0,71	0,73	0,78
6	0,68	0,68	0,71	0,73
8	0,62	0,6	0,63	0,66
10	0,53	0,52	0,54	0,57
12	0,4	0,4	0,42	0,45

Tabelle 7.14: Ergebnisse der Experimente für den Algorithmus ohne Ressourceneinschränkungen

Um die Leistungsfähigkeit des Algorithmus zu überprüfen, wurden Experimente durchgeführt, bei denen eine rein zufällige Zuordnung von Aufträgen auf die Cluster vorgenommen wurde. Auch hierbei konnten geringe Varianzverbesserungen festgestellt werden, ein F-Wert von 0,96 wurde bei den Zufallsexperimenten jedoch nicht unterschritten.

Weiterhin wurde untersucht, ob durch eine größere Anzahl von Ausführungen des Algorithmus weitere bessere Lösungen gefunden werden können. Dabei konnte festgestellt werden, dass selbst bei großen Versuchszahlen ( $n \approx 100$ ) nur geringe Lösungsverbesserungen (<2%) gegenüber der besten nach 20 Durchläufen gefundenen Lösung erreicht werden konnten. Für die hier gerechneten Versuchsreihen wurde daher davon ausgegangen, dass eine sehr hohe Lösungsgüte nach 20 Durchläufen erreicht werden kann.

Es kann festgehalten werden, dass die systematische Auswahl der Clusterzentren in den meisten Fällen sehr gute Ergebnisse liefert. Die Güte der Lösung des Algorithmus mit zufälliger Auswahl der Initial-Clusterzentren ist jedoch bei Inkaufnahme mehrerer Durchläufe noch etwas

besser als bei der systematischen Auswahl. Da die Laufzeit des Algorithmus auch bei einer hohen Anzahl von Kundenaufträgen und Montageabschnittszeiten sehr gering ist, sollte die mehrfache Durchführung des Algorithmus mit der zufälligen Auswahlmethode vorgezogen werden.

### 7.2.2 Auftragszuordnung mit Ressourceneinschränkungen

Für die Anwendung des Algorithmus zur Auftragszuordnung mit Ressourceneinschränkung wird die gleiche Kundenauftragsdatei verwendet wie im vorangegangenen Fall. Hier wird jedoch zusätzlich davon ausgegangen, dass zu jedem Auftrag vier Ressourcenanforderungen hinterlegt sind, durch die die Baubarkeit der Aufträge auf den Linien festgelegt werden kann.

Für die Experimente werden drei Montagesysteme mit jeweils sechs Montagelinien angenommen, die sich durch ihre Ressourcenausstattung unterscheiden:

„Vollflexibles Montagesystem“

„Teilflexibles Montagesystem“

„Beschränktes Montagesystem“

Im vollflexiblen Montagesystem sind die sechs Montagelinien jeweils mit allen vier Ressourcen ausgestattet. Jeder Auftrag kann somit jeder Linie zugeordnet werden, so dass dieser Fall der Auftragszuordnung ohne Ressourceneinschränkung entspricht.

Montagelinie	Ressourcen			
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1

Tabelle 7.15: Ressourcenausstattung des vollflexiblen Montagesystems

Im teilflexiblen Montagesystem ist die Ressourcenausstattung von drei der Montagelinien eingeschränkt worden, so dass hier eine Einschränkung der möglichen Zuordnungen stattfindet.

Montagelinie	Ressourcen			
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	0	1	1
5	1	1	0	1
6	1	1	1	0

Tabelle 7.16: Ressourcenausstattung des teilflexiblen Montagesystems

Eine weitere Einschränkung findet im beschränkten Montagesystem statt, in dem nur zwei vollflexible Linien zur Verfügung stehen. Das System ist so ausgelegt, dass das Produktionsprogramm gerade auf den Montagelinien baubar ist. Die vollflexiblen Montagelinien sind hier immer noch notwendig, da es Aufträge gibt, die alle vier Ressourcen erfordern.

Montagelinie	Ressourcen			
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	0
4	0	1	1	0
5	0	1	1	1
6	1	0	0	1

Tabelle 7.17: Ressourcenausstattung des beschränkten Montagesystems

Die Ergebnisse der Experimente der Auftragszuordnung mit Ressourceneinschränkungen sind in Tabelle 7.18 dargestellt. Vergleicht man die Lösungsgüte der Experimente im vollflexiblen System mit den Ergebnissen aus den Versuchen der Auftragszuordnung ohne Ressourceneinschränkungen, so sind nur geringe Abweichungen zu erkennen. Dies ist auf die zufällige Auswahl der Initial-Clusterzentren zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen somit, dass der Algorithmus für die Auftragszuordnung mit Ressourceneinschränkung ebenso effektiv arbeitet wie der Algorithmus für die Auftragszuordnung ohne Ressourceneinschränkung.

Konfiguration des Montagesystems	Güte der Clusterlösung bei zufälliger Wahl der Initial-Clusterzentren (Ergebnisse nach 20 Ausführungen des Algorithmus)		
	bester Wert	mittlerer Wert	schlechtester Wert
vollflexibel	0,68	0,71	0,72
teilflexibel	0,86	0,90	0,93
beschränkt	0,95	0,95	0,96

Tabelle 7.18: Ergebnisse der Experimente für den Algorithmus mit Ressourceneinschränkungen

Zu erkennen ist ebenfalls, dass die Lösungsgüte mit zunehmender Einschränkung des Ressourcenangebots abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Aufträge, die sich ähneln, gegebenenfalls nicht mehr demselben Cluster zugeordnet werden können. Werden die Zuordnungsmöglichkeiten weiter eingeschränkt, sinkt die Lösungsgüte. Jedoch kann im stark beschränkten Montagesystem noch eine geringe Verringerung der durchschnittlichen Varianz der Bearbeitungszeiten gegenüber der Grundgesamtheit von 5 % erreicht werden.

Die Laufzeit des Algorithmus liegt bei der Auftragszuordnung mit Ressourceneinschränkung etwas höher als bei der Auftragszuordnung ohne Einschränkungen. Es konnte festgestellt werden, dass die Laufzeit mit zunehmender Einschränkung der Baubarkeit zunimmt, da hier die Methoden zur Verschiebung bereits zugeordneter Aufträge häufiger aufgerufen werden müssen. Die Berechnungszeiten lagen in allen Fällen im Bereich von wenigen Sekunden.<sup>158</sup>

Durch die Experimente konnte die Funktionsfähigkeit der Algorithmen nachgewiesen werden. Es konnte gezeigt werden, dass durch eine gezielte Zuordnung von Kundenaufträgen auf parallele Linien eine Verringerung der auf den Montagelinien auftretenden Montagezeitvarianz erreicht werden kann, wodurch eine Erhöhung der Kapazitätsauslastung in Folge einer verbesserten Austaktung und Reihenfolgeplanung zu erwarten ist. Ebenso konnte festgestellt werden,

<sup>158</sup> Mit einem 1.60 GHz Prozessor wurden für die durchgeführten Experimente der Auftragszuordnung mit Ressourceneinschränkung Laufzeiten von 2 bis 10 Sekunden gemessen.

dass die Möglichkeiten zur Varianzreduktion mit zunehmender Einschränkung der Zuordnungsmöglichkeiten von Aufträgen die Linien abnimmt. Durch eine genauere Untersuchung der Auswirkungen der Varianzunterschiede auf die Arbeitskosten, z.B. durch Simulationsanalysen, können Entscheidungen zur Festlegung des Flexibilitätsgrads der Montagelinien unterstützt werden.

### 7.3 Beispiel für eine Anpassungsplanung unter Unsicherheit

Das in Kapitel 5.3 entwickelte Verfahren zur Anpassungsplanung von Fließproduktionsstrukturen soll im Folgenden anhand eines Beispiels untersucht werden. Aufgrund der zweistufig stochastischen Formulierung des Planungsproblems handelt es sich um ein relativ komplexes Optimierungsproblem, für dessen Lösung auch beim Einsatz von leistungsfähigen kommerziellen Optimierungssoftwares lange Rechenzeiten zu erwarten sind. Um auch für praxisrelevante Problemgrößen Lösungen in akzeptabler Zeit zu erhalten, wurde eine Heuristik entwickelt, die als so genannter hybrider Genetischer Algorithmus eingeordnet wurde. Da die Laufzeit und Lösungsgüte der Heuristik von verschiedenen Parametern abhängt, sollen diese Zusammenhänge anhand eines Fallbeispiels untersucht werden.

Die Struktur des betrachteten Montagesystems setzt sich aus zwei Vormontagen und zwei Endmontagen zusammen. Auf den Vormontagen wird das Vorprodukt *VP* hergestellt, das zur Montage des Endproduktes *EP* auf den Endmontagelinien benötigt wird (siehe Abbildung 7.7).

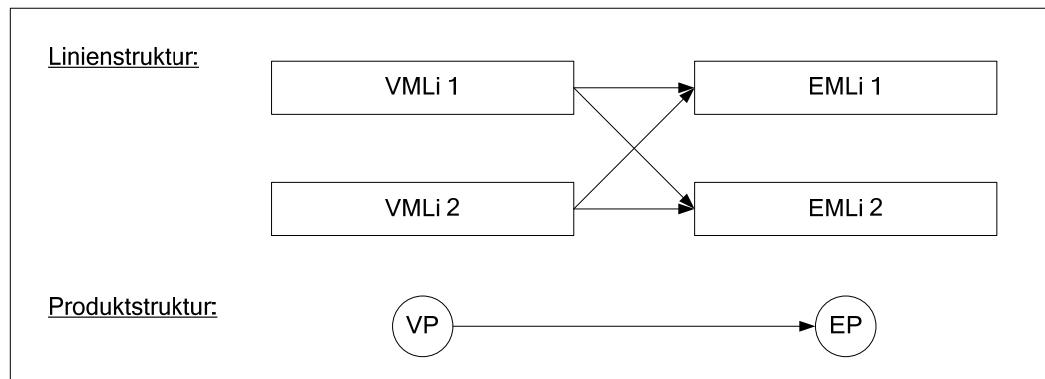


Abbildung 7.7: Produkt- und Liniensstruktur im Fallbeispiel

Die Angaben über die Nachfrage nach dem Endprodukt *EP* unterliegen der Unsicherheit. Die erwarteten Stückzahlen können daher nur abgeschätzt werden, wobei die möglichen Abweichungen vom Planszenario gegen Ende des Planungshorizontes auf bis zu 20 % zunehmen. Damit kann ein Abweichungskorridor für die Stückzahlen angeben werden, innerhalb dem die tatsächliche Nachfrage voraussichtlich liegen wird. Für die Experimente werden innerhalb dieses Korridors mehrere Nachfrageszenarien generiert. Jedem der Nachfrageszenarien wird eine Auftretenswahrscheinlichkeit zugeordnet, wobei die Wahrscheinlichkeit für das Planszenario am höchsten angenommen wird.

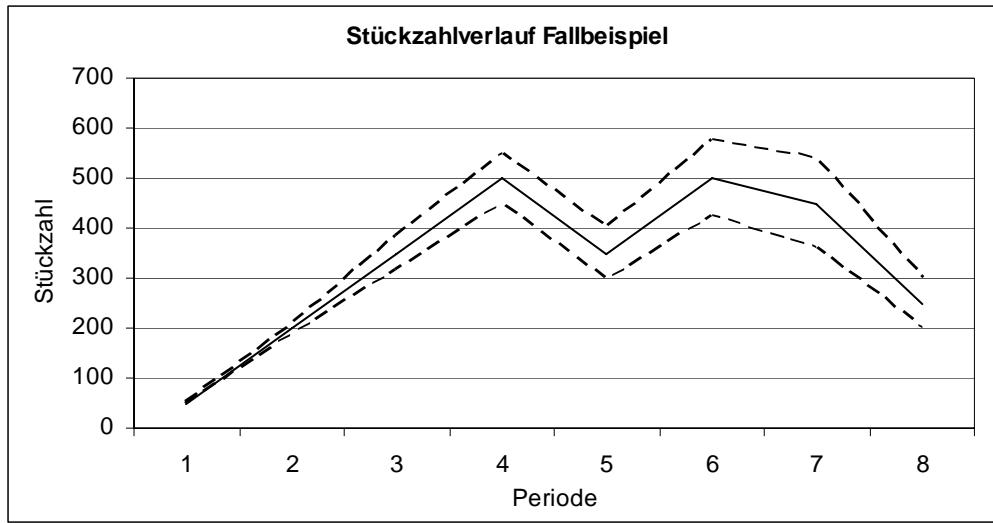


Abbildung 7.8: Stückzahlverlauf und Unsicherheitskorridor im Fallbeispiel

Hinsichtlich der Produktionskapazität können die Produktionslinien in mehreren Stufen angepasst werden. Dabei stehen je Produktionslinie zwei unterschiedliche technische Stufen zur Verfügung sowie jeweils zwei organisatorische Stufen. Die Kapazitäten der Linien in den unterschiedlichen Zuständen sind in Tabelle 7.19 dargestellt.

Technische Stufe	Organisatorische Stufe	Vormontagelinien	Kapazität	Endmontagelinien	Kapazität
0	1	VMLi 1	0	EMLi 1	0
0	2	VMLi 1	0	EMLi 1	0
1	1	VMLi 1	100	EMLi 1	125
1	2	VMLi 1	200	EMLi 1	250
2	1	VMLi 1	150	EMLi 1	200
2	2	VMLi 1	300	EMLi 1	300
0	1	VMLi 2	0	EMLi 2	0
0	2	VMLi 2	0	EMLi 2	0
1	1	VMLi 2	150	EMLi 2	150
1	2	VMLi 2	300	EMLi 2	300
2	1	VMLi 2	200	EMLi 2	250
2	2	VMLi 2	400	EMLi 2	350

Tabelle 7.19: Kapazitäten der Montagelinien in den verschiedenen Zuständen

Zur wirtschaftlichen Bewertung der Anpassungsoptionen werden die Kostendaten für alle Eingangsparameter des Modells vorgegeben. Dazu gehören die Kosten für den Wechsel der technischen sowie organisatorischen Stufen, die (Fix-)Kosten für den Betrieb der Linien in einem bestimmten Zustand und die Transportkosten zwischen den Linien sowie zum Markt und die Kosten für nicht erfüllte Nachfragemengen. Zur Berechnung des Kapitalwertes der unterschiedlichen Anpassungspfade wird ein Zinssatz von 7% angenommen. Beispielhaft sind einige Kosten in Tabelle 7.20 bis Tabelle 7.23 angegeben.

Vormontagelinien	von ts	zu ts	Kosten	Endmontagelinien	von ts	zu ts	Kosten
VMLi 1	0	1	250	EMLi 1	0	1	350
VMLi 1	0	2	500	EMLi 1	0	2	700
VMLi 2	0	1	300	EMLi 2	0	1	400
VMLi 2	0	2	600	EMLi 2	0	2	800

Tabelle 7.20. Kosten für Aufbau der Linien (Wechsel der technischen Stufe)

Montagelinie	ts	os	Betriebskosten
VMLi 1	1	0	0
VMLi 1	1	1	100
VMLi 1	1	2	200
VMLi 1	2	0	0
VMLi 1	2	1	200
VMLi 1	2	2	400

Tabelle 7.21: Betriebskosten der Vormontagelinie 1 in Abhängigkeit der organisatorischen Stufe

Montagelinie	ts	von os	zu os	Anpassungskosten
VMLi 1	1	0	0	0
VMLi 1	1	0	1	50
VMLi 1	1	0	2	100
VMLi 1	1	1	0	20
VMLi 1	1	1	1	0
VMLi 1	1	1	2	50
VMLi 1	1	2	0	40
VMLi 1	1	2	1	20
VMLi 1	1	2	2	0

Tabelle 7.22: Anpassungskosten bei Wechsel der organisatorischen Stufe der Vormontagelinie 1

von	zu	Transportkosten
VMLi 1	EMLi 1	10
VMLi 1	EMLi 2	10
VMLi 2	EMLi 1	15
VMLi 2	EMLi 2	15
EMLi 1	Markt	10
EMLi 2	Markt	20

Tabelle 7.23: Transportkosten im Beispiel

Die Daten des Fallbeispiels wurden in einer Datenbankanwendung abgelegt und können dort unabhängig vom mathematischen Modell verwaltet und geändert werden. Die Lösung des Optimierungsproblems aus Kapitel 5.3.2 erfolgt durch eine Standardsoftware zur Lösung zur linearen Optimierung<sup>159</sup>, die über ein Java-Programm gesteuert wird. Über das Java-Programm wird auch die Steuerung der in Kapitel 5.3.3 entwickelten Heuristik vorgenommen.

Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit des Verfahrens werden in den Experimenten zunächst unterschiedliche Problemgrößen exakt mittels des in den Standardsolver integrierten

<sup>159</sup> CPLEX 11.0 von ILOG.

Branch&Bound-Verfahrens gelöst. Die Lösungszeit der Optimierung hängt hier nur von den Parametereinstellungen des Solvers ab, die aus Gründen der Vergleichbarkeit auch für die Lösung der Subprobleme des hybriden Genetischen Algorithmus verwendet werden. Der Zielfunktionswert ist dabei exakt und unabhängig von der Lösungszeit. Beim hybriden Genetischen Algorithmus müssen zusätzlich die Parameter der Heuristik beachtet werden, die einen entscheidenden Einfluss auf die Lösungszeit und -güte haben.

Ein wichtiger Parameter bei der Nutzung von Genetischen Algorithmen ist der Selektionsdruck, der den Quotienten  $s = \mu/\lambda$  angibt.<sup>160</sup> Der Selektionsdruck kann durch Variation der Werte von  $\lambda$  und  $\mu$  beliebig zwischen den Extremwerten 0 (starker Selektionsdruck) und 1 (schwacher Selektionsdruck) eingestellt werden. Durch Voruntersuchungen konnte dabei festgestellt werden, dass ein mittlerer Selektionsdruck von etwa 0,5 für das vorliegende Problem sowohl bezüglich der gefundenen besten Lösung als auch bezüglich der Streuung der Ergebnisse die besten Werte lieferte.

Montagelinie	Periode							
	1	2	3	4	5	6	7	8
VMLi 1	-	-	2	2	2	2	2	2
VMLi 2	1	1	1	1	1	1	1	1
EMLi 1	-	-	1	1	1	1	1	1
EMLi 2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabelle 7.24: Optimale Anpassungsstrategie für das Beispiel

In einem ersten Schritt wurde der Einfluss der Generationsanzahl als Parameter des Genetischen Algorithmus untersucht. Für die Versuche wurden dabei Probleminstanzen mit zwei Szenarien verwendet. Die exakte Lösung des Beispielproblems bezüglich der technischen Stufen ist in Tabelle 7.24 angegeben.

Die Resultate der Versuchsreihen für die Heuristik sind in Tabelle 7.25 dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich die erreichten Zielfunktionswerte mit steigender Generationsanzahl verbessern. Allerdings traten selbst bei einer Generationenanzahl von 20 noch Zielfunktionswerte auf, die bis zu 9% neben dem Optimum liegen.

Versuchsreihe	Anzahl Eltern	Anzahl Kinder	max. Alter	Anzahl Generationen	Abweichung vom Optimum (Ergebnisse nach je 20 Durchläufen)			durchschn. Rechenzeit (sec.)
					bestes	mittleres	schlechtestes	
1.1	2	5	1	5	5,03%	19,66%	27,49%	86
1.2	2	5	1	10	0,00%	12,02%	25,14%	135
1.3	2	5	1	20	2,07%	5,23%	8,76%	202

Tabelle 7.25: Vergleich der Ergebnisse der Heuristik bei Änderung der Generationsanzahl

Daher wurde in weiteren Versuchsreihen der Einfluss der Populationsgröße untersucht. Hier wurde auch das maximale Alter der Individuen erhöht. Zu erkennen ist, dass sich sowohl die gefundenen Lösungen verbessern als auch Streuung der Ergebnisse mit steigender Populationsgröße abnimmt.

<sup>160</sup> Zur Beschreibung der Parameter siehe Kapitel 5.3.3.

Versuchsreihe	Anzahl Eltern	Anzahl Kinder	max. Alter	Anzahl Generationen	Abweichung vom Optimum (Ergebnisse nach je 20 Durchläufen)			durchschn. Rechenzeit (sec.)
					bestes	mittleres	schlechtestes	
2.1	5	10	5	10	6,97%	10,56%	21,56%	235
2.2	10	20	5	10	0,00%	1,54%	6,97%	388
2.3	20	35	5	10	0,00%	0,98%	2,18%	631

Tabelle 7.26: Vergleich der Ergebnisse der Heuristik bei Änderung der Populationsgröße

Ein entscheidender Faktor bei der Festlegung der Parameter der Heuristik ist die benötigte Rechenzeit, die sich bei gleicher Problemgröße annähernd proportional zu der Anzahl der zu berechnenden Individuen verhält (siehe Tabelle 7.25 und Tabelle 7.26). Dennoch ist ebenfalls zu erkennen, dass innerhalb akzeptabler Rechenzeiten bereits gute Ergebnisse durch die Heuristik erreicht werden können.

Um die Leistungsfähigkeit der Heuristik mit dem exakten Verfahren anhand der Rechenzeiten zu vergleichen, wurde in weiteren Versuchsreihen die Laufzeit der beiden Verfahren für unterschiedliche Problemgrößen untersucht. Dabei wurde die Parametereinstellung der Heuristik so vorgenommen, dass innerhalb von 20 Versuchen kein Zielfunktionswert berechnet wurde, der mehr als 2,5% vom tatsächlichen Optimum entfernt lag. Zu beobachten ist, dass die Rechenzeit der Heuristik in etwa proportional zu der Szenarienanzahl ansteigt (Abbildung 7.9). Bei der Probleminstanz mit zwei Szenarien liegt die Rechenzeit der Optimierung nur in etwa bei der Hälfte der Rechenzeit der Heuristik. Dagegen steigt die Rechenzeit des exakten Verfahrens jedoch bereits bei der Probleminstanz mit drei Szenarien auf etwa eine Stunde, während die Heuristik im Minutenbereich gute Lösungen liefert. Für sehr große Probleminstanzen ist damit zu rechnen, dass innerhalb akzeptabler Zeiten keine exakten Lösungen gefunden werden können.

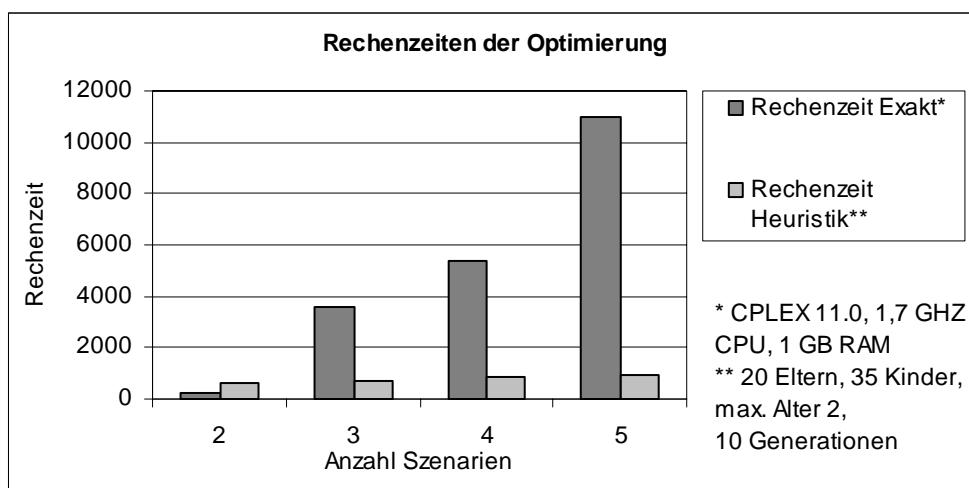


Abbildung 7.9: Vergleich der Rechenzeiten von exaktem Verfahren und Heuristik

Durch die Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass für das vorliegende Fallbeispiel durch die Heuristik im Minutenbereich gute Lösungen gefunden werden können. Insbesondere die bei großen Probleminstanzen auftretenden langen Rechenzeiten des exakten Verfahrens sprechen dabei für einen Einsatz der Heuristik. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichend große Populationsgröße und Generationszahl. Allerdings ist zu beachten, dass durch die Heuristik kein Be-

weis der Optimalität erreicht werden kann und die hier gefundenen Parameterkonstellationen nur auf vergleichbare Problemgrößen übertragen werden können.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangspunkt dieser Arbeit war die Erkenntnis, dass die hohe Variantenvielfalt und Dynamik der Nachfragemärkte als vorrangigste Herausforderung für die Produktionsplanung angesehen werden können.

Auf die zunehmende Globalisierung und den gleichzeitigen Wettbewerbsdruck reagieren die Unternehmen durch eine kontinuierliche Erhöhung des Variantenangebots, um auch in stagnierenden Märkten neue Kunden anzusprechen. Die Erweiterung des Angebots schlägt sich jedoch auch auf die unternehmensinternen Prozesse von der Entwicklung bis hin zum Vertrieb nieder, wo sich die zunehmende Variantenvielfalt in Form einer erhöhten Komplexität und letztendlich auch in Form erhöhter Kosten äußert. In getakteten Montagebereichen, dem Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit, äußert sich dabei die Variantenproblematik aufgrund der unterschiedlichen Bearbeitungszeiten in Form von Wartezeiten an den Bearbeitungsstationen und dem Einsatz von Unterstützungsarbeitskräften.

Grundlage für alle Produktionsprozesse bildet die Struktur der Montageanlage. Daraus kann die Forderung abgeleitet werden, bereits während der Strukturplanung der Produktionsanlagen einen stärkeren Fokus auf die Effizienz zu legen und Lösungsansätze zu suchen, die eine Verbesserung der Planung ermöglichen. Klassische Ansätze der späten Kundenauftragszuordnung und einer Kapazitätsteilung in Renner- und Exotenlinien sind auf das hier beschriebene Problem nicht vollständig anwendbar oder wurden daher im Rahmen dieser Arbeit durch eine stärkere Fokussierung auf die tatsächlichen Auswirkungen der Produkteigenschaften auf die Produktionskosten neu untersucht.

Ein weiteres Problem ist, dass zum Zeitpunkt der Strukturplanung nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Stückzahlen für den zu planenden Anlagenlebenszyklus vollständig bekannt sind. Dies ist insbesondere ein Problem für die nur schwer revidierbaren Entscheidungen bei der Strukturplanung, die im Rahmen einer Flexibilitätsplanung abzusichern sind. Daraus wurde die Anforderung an ein Verfahren abgeleitet, dass die Unsicherheit bezüglich der tatsächlich eintretenden Nachfrage bereits während der Planung des Montagesystems berücksichtigt.

Diese Herausforderungen wurden durch die Entwicklung von drei Ansätzen bearbeitet, die zu einer Verbesserung der Strukturplanung beitragen sollen. Hierbei wurde unterschieden zwischen Fließproduktionssystemen mit offenen und geschlossenen Stationsgrenzen sowie Montagesystemen, in denen die zeitliche Abfolge des Strukturelementeaufbaus festzulegen ist.

Für die Abbildung der Effizienzverluste in Fließproduktionssystemen mit geschlossenen Stationsgrenzen wurde der Ansatz der Montageabschnitte entwickelt. Durch diesen Ansatz kann bereits während der Grobplanung bewertet werden, welche Effekte das Zusammenlegen mehrerer Produktvarianten auf eine Montagelinie hat, ohne eine explizite Austaktung auf die einzelnen Arbeitsstationen vornehmen zu müssen. So kann zum einen die Anforderung umgangen werden, bereits zu einem frühen Planungszeitpunkt über einen vollständigen Vorranggraphen zu verfügen, zum anderen kann die Komplexität des Entscheidungsproblems soweit reduziert wer-

den, dass eine optimale Entscheidung bezüglich der Systemteilung gefunden werden kann. Als weitere entscheidungsrelevante Parameter werden in dem Ansatz Kosten für technische Ressourcen sowie Aufbaukosten für Linien und Stationen berücksichtigt. Diese Zusammenhänge wurden in Form eines mathematischen Programms formuliert. Die Entscheidung über die anhand der Gesamtkosten bestimmbaren optimalen Systemteilung und Variantenzuordnung kann dann mit Hilfe von Standardverfahren der mathematischen Optimierung erfolgen.

Eine direkte Übertragung des obigen Ansatzes auf Fließproduktionssysteme mit offenen Stationsgrenzen ist nicht möglich, da hier ein Belastungsausgleich durch Überschreiten der Stationsgrenzen stattfinden kann. Doch auch hier können Ansätze gefunden werden, die Systemteilung für eine Effizienzsteigerung der Montageabläufe zu nutzen. Dazu wurde das Ersatzziel der Varianzminimierung identifiziert. Sinkt die Schwankungsbreite der Belastungszeiten an den Arbeitstationen, können diese im Durchschnitt höher ausgelastet werden, ohne das Driftverhalten der Werker an diesen Stationen zu erhöhen. Gleichzeitig sinkt auch die Anzahl der für die Reihenfolgeplanung zu berücksichtigenden Stationen, an denen Überlastungen zu vermeiden sind. Zur Umsetzung einer varianzminimierenden Auftragszuordnung wurde daher ein Verfahren entwickelt, das auf Basis eines Clustering-Ansatzes die Kundenaufträge so auf die Produktionslinien zuordnet, dass auf den einzelnen Stationen eine möglichst geringe Varianz der Bearbeitungszeiten besteht. Da auch der Fall vorliegen kann, dass die parallelen Linien nicht alle vollflexibel ausgelegt sind und somit nicht jeder Auftrag auf jeder Linie baubar ist, wurde dieses Verfahren so erweitert, dass auch unter diesen Prämissen Zuordnungen mit möglichst geringer Varianz gefunden werden. Dieser Zuordnungsalgorithmus kann sowohl in der Anlagenplanung als auch in der operativen Programmplanung genutzt werden. Bei der Erstauslegung und Rekonfiguration dient der Algorithmus dazu, durch die Aufteilung von prognostizierten Kundenaufträgen die Prämissen für die Austaktung zu ermitteln. Während des Betriebes kann der Algorithmus dazu eingesetzt werden, die tatsächlichen Kundenaufträge auf die Linien zuzuordnen.

Während bei den beiden erstgenannten Ansätzen vorrangig die Optimierung der Montageeffizienz verfolgt wird, rücken bei verteilten und stückweise aufzubauenden Produktionsanlagen die Transportkosten und die Aufbaustrategie in den Vordergrund. Hier ist es insbesondere wichtig, bereits in der Planungsphase die Entscheidungen bezüglich der zu installierenden Kapazitäten an den einzelnen Standorten gegenüber Nachfrageunsicherheiten abzusichern. Wenn zu erwarten ist, dass sich die Stückzahlen über einen langen Zeitraum hinweg kontinuierlich erhöhen, z.B. im Fall von Neuanläufen, ist eine geeignete Anpassungsstrategie zu entwickeln. Die Planung der Anpassung kann dabei als zweistufiges Problem beschrieben werden. Innerhalb der ersten Stufe sind Entscheidungen zu treffen, die nur schwer revidierbar sind und zum Zeitpunkt der Planung und damit der Unsicherheit über die tatsächlich eintretenden Nachfragemengen getroffen werden müssen. Dazu gehören die Entscheidungen über die zu installierenden technischen Kapazitäten und Flexibilitätsgrade. Als Entscheidungen der zweiten Stufe werden dann alle Entscheidungen definiert, die nach der Realisierung einer tatsächlichen Nachfrage bezüglich des Produktionsprogramms getroffen werden müssen. Angewendet auf die Montagestrukturplanung wurde in dieser Arbeit ein zweistufig-stochastisches Optimierungsproblem formuliert, in dem die Nachfrageunsicherheit in Form von Szenarien abgebildet wird. Ziel der Optimierung ist die Bestimmung der Anpassungsstrategie, die über alle Szenarien den günstigsten

---

Kapitalwert liefert. Aufgrund der hohen Komplexität des Entscheidungsproblems wird anschließend eine Heuristik vorgestellt, die auf einem genetischen Algorithmus basiert und auch für eine hohe Szenarienanzahl Lösungen liefert.

Alle Verfahren wurden in prototypischen Softwaresystemen umgesetzt und konnten den Funktionsnachweis für praxisrelevante Problemstellungen erbringen.

Abschließend erfolgt die Einordnung der Verfahren in ein allgemeines Vorgehensmodell zur Planung von Fließproduktionssystemen. Als Erweiterung zu bekannten Modellen zur Planung von Montagesystemen werden hier die Prozesse der Flexibilitätsplanung sowie der Anpassungsplanung bzw. Rekonfiguration integriert. Das Vorgehensmodell kann damit in Kombination mit den vorgestellten Verfahren als Grundlage für die durchgängige und systematische Planung von Fließproduktionssystemen eingesetzt werden.

Weitere Forschungsfragen im Umfeld dieser Arbeit ergeben sich beispielsweise im Umgang mit der Unsicherheit, da die Entscheidung für einen bestimmten Flexibilitätsgrad von der persönlichen Risikoeinstellung des Planers und den in Betracht gezogenen Zukunftsszenarien abhängt. Auch das als ursächlich für die Effizienzverluste in der Montage identifizierte Problem der Zeitspreizung und Montagezeitenvarianz sollte in weiteren Forschungsvorhaben untersucht werden. Das Herauslösen von besonders varianzreichen Montageinhalten aus der Hauptmontagelinie durch Verlagerung in Modulvormontagen kann Kostenvorteile bringen, die jedoch erst durch eine Prüfung der betroffenen Produktions- und Logistikprozesse bestimmt werden können. Die Grundlage für die Bewertung können die hier vorgestellten Ansätze bilden.

## Literaturverzeichnis

- Abele, E.; Bäßler, R.; Wolf, E. M.; Zitzler, P. (1985): Einsatzmöglichkeiten flexibel automatisierter Montagesysteme. In: FHG-Berichte, H. 3/4, S. 3–8.
- Adam, D. (1998): Produktions-Management. Gabler, Wiesbaden.
- Adil, G.; Rajamani, D.; Strong, D. (1996): Cell formation considering alternate routeings. In: International Journal of Production Research, Jg. 34, H. 5, S. 1361–1380.
- Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R. (2006): Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung. 11. überarb. Auflage. Springer, Berlin.
- Bühlmaier, R.; Koberstein, A.; Obst, R. (2008): Modeling and optimizing of strategic and tactical production planning in the automotive industry under uncertainty. In: OR Spectrum. Online unter: [www.springerlink.com/content/3jl3577326h51416/fulltext.pdf](http://www.springerlink.com/content/3jl3577326h51416/fulltext.pdf), heruntergeladen am 15.10.2008.
- Birge, J. R.; Louveaux, F. (1997): Introduction to Stochastic Programming. Springer, New York.
- Boysen, N. (2005a): Reihenfolgeplanung bei Variantenfließfertigung: Ein integrativer Ansatz. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 75, H. 2, S. 135–156.
- Boysen, N. (2005b): Variantenfließfertigung. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2006): Assembly line balancing: Which model to use when? Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft, 23/2006, Jena.
- Bullinger, H.-J. (1986): Systematische Montageplanung. Carl Hanser, München.
- Bullinger, H.-J. (1993): Planung entkoppelter Montagesysteme: Puffer in der Montage. Teubner, Stuttgart.
- Bullinger, H.-J. (1995): Arbeitsgestaltung – Personalorientierte Gestaltung marktgerechter Arbeitssysteme. Teubner, Stuttgart.
- Bundschuh, J. (2008): Modellgestützte strategische Planung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie. Dr. Kovac, Hamburg.
- Chiou, Y.; Lan, L. (2001): Genetic clustering algorithms. In: European Journal of Operational Research, Jg. 135, S. 413–427.
- Ciarla, R. (2006): Krieger für die Ewigkeit: Die Terrakotta-Armee des ersten Kaisers von China. White-Star-Verlag, Wiesbaden.
- Cowgill, M.; Harvey, R.; Watson, L. (1999): A genetic algorithm approach to cluster analysis. In: Computers and Mathematics with Applications, Jg. 37, H. 7, S. 99–108.
- Coyle, G. (1997): The nature and value of future studies or do futures have a future? In: Futures, Jg. 29, H. 1, S. 77–93.

- Dangelmaier, W. (2001): *Fertigungsplanung*. 2. Auflage. Springer, Berlin.
- Dangelmaier, W. (2003): *Produktion und Information – System und Modell*. Springer, Berlin.
- Dantzig, G.B.; Wolfe, P. (1960): Decomposition principle for linear programs. In: *Operations Research*, Jg. 8, S. 101–11.
- Dittmayer, S. (1981): *Arbeits- und Kapazitätsteilung in der Montage*. Springer, Berlin.
- Eversheim, W. (1989): *Fertigung und Montage*. 2. neubearb. u. erw. Auflage. VDI Verlag, Düsseldorf.
- Eversheim, W.; Schuh, G. (1999): *Gestaltung von Produktionssystemen*. Springer, Berlin.
- Falkenauer, E. (2005): Line balancing in the real world. In: *Proceedings of the International Conference on Product Lifecycle Management PLM 05*. Université Lumière Lyon.
- Feldmann, K.; Gergs, H.-J.; Slama, S.; Wirth, U. (2004): *Montage strategisch ausrichten – Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen*. Springer, Berlin.
- Ferber, S. (2005): *Strategische Kapazitäts- und Investitionsplanung in der globalen Supply Chain eines Automobilherstellers*. Shaker, Aachen.
- Fischäder, H. (2005): *Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen*. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Friese, M. (2008): *Planung von Flexibilitäts- und Kapazitätsstrategien für Produktionsnetzwerke der Automobilindustrie*. PZH Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen.
- Gälweiler, A. (1986): *Unternehmensplanung – Grundlagen und Praxis*. Campus, Frankfurt a. M.
- Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O. (1996): *Szenario-Management – Planen und Führen mit Szenarien*. 2. bearbeitete Auflage. Carl Hanser, München.
- Gerdes, I.; Klawonn, F.; Kruse, R. (2004): *Evolutionäre Algorithmen – Genetische Algorithmen – Strategien und Optimierungsverfahren – Beispieldaten*. Vieweg, Wiesbaden.
- Gottschalk, S. (2006): *Dedicated Flexibility – Kapazitätsoptimale Gestaltung manueller Serienmontage*. Shaker, Aachen.
- Grundig, C.-G. (2006): *Fabrikplanung – Planungssystematik – Methoden – Anwendungen*. 2., aktualisierte Auflage. Hanser, München.
- Gupta, T. (1993): Design of manufacturing cells for flexible environment considering alternative routeing. In: *International Journal of Production Research*, Jg. 31, H. 6, S. 1259–1273.
- Henrion, R.; Henrion, G. (1995): *Multivariate Datenanalyse – Methodik und Anwendung in der Chemie und verwandten Gebieten*. Springer, Berlin.
- Hernández Morales, R. (2003): *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. VDI Verlag, Düsseldorf.
- Höck, M. (1998): *Produktionsplanung und -steuerung einer flexiblen Fertigung: Ein prozeßorientierter Ansatz*. Gabler, Wiesbaden.

- Holland, J. (1975): Adaption in nature and artificial systems. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Iyer, L.; Aronson, J. (1999): A parallel branch and bound method for cluster analysis. In: *Annals of Operations Research*, Jg. 90, S. 65–86.
- Jensen, R. E. (1969): A dynamic programming algorithm for cluster analysis. In: *Operations Research*, Jg. 12, S. 1034–1057.
- Kall, P.; Wallace, S. W. (1994): Stochastic programming. Wiley, Chichester.
- Kaufmann, H. (1996): Clusteranalyse. In: Fahrmeir, L. (Hg.): *Multivariate statistische Verfahren*. 2. überarb. Auflage. De Gruyter, Berlin, S. 437–536.
- Kersten, W. (2000): Integration von Vielfaltsmanagement in das Führungssystem des Unternehmens – Handlungsbedarf und Lösungsansätze. In: Wildemann, H. (Hg.): *Produktion und Controlling*. TCW Transfer-Centrum, München, S. 201–222.
- Koether, R. (1986): Verfahren zur Verringerung von Modell-Mix-Verlusten in Fließmontagen. Springer, Berlin.
- Kosiol, E. (1976): Organisation der Unternehmung. Gabler, Wiesbaden.
- Kratzsch, S. (2000): Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen. Vulkan-Verlag, Essen.
- Krüger, A. (2004): Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme. Herbert Utz, München.
- Krycha, K.-T. (1996): Produktionstypologien. In: Kern, W.; Schröder H.-H.; Weber J. (Hg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. 2. völlig neu gestaltete Auflage. Schaeffer-Poeschel, Stuttgart, S. 1617–1629.
- Laengle, K.; Griffin, P.; Griffin, S. (1994): A quantification of the economic value of flexible capacity. In: *International Journal of Production Research*, Jg. 32, H. 6, S. 1421–1430.
- Lancaster, K. (1990): The Economics of Product Variety: A Survey. In: *Marketing Science*, Jg. 9, H. 3, S. 189–206.
- Lashkari, R.; Raja Gunasingh, K. (1990): A Langrangian relaxation approach to machine allocation in cellular manufacturing systems. In: *Computers and Industrial Engineering*, Jg. 19, H. 1-4, S. 442–446.
- Leopold, N. (1997): Ein Planungsverfahren zur Kapazitätsabstimmung für Modell-Mix-Montagelinien am Beispiel einer Automobil-Endmontage. Springer, Berlin.
- Lingnau, V. (1994): Variantenmanagement. Produktionsplanung im Rahmen einer Produktdifferenzierungsstrategie. Erich Schmidt, Berlin.
- Lotter, B. (1986): Wirtschaftliche Montage – Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. VDI Verlag, Düsseldorf.
- Lotter, B.; Hartel, M.; Menges, R. (1998): Manuelle Montage – wirtschaftlich gestalten. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim.

- Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (2006): Montage in der industriellen Produktion. Springer, Berlin.
- Maune, G. (2002): Möglichkeiten des Komplexitätsmanagements für Automobilhersteller auf Basis IT-gestützter durchgängiger Systeme. Shaker, Aachen.
- Merz, K.-P. (1987): Entwicklung einer Methode zur Planung der Struktur automatisierter Montagesysteme. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Metzger, H. (1977): Planung und Bewertung von Arbeitssystemen in der Montage. Krausskopf-Verlag, Mainz.
- Müller, R. (2002): Planung hybrider Montagesysteme auf Basis mehrschichtiger Vorranggruppen. Shaker, Aachen.
- Mulvey, J. M.; Crowder, H. (1979): Cluster analysis: An application of Lagrangian relaxation. In: *Management Science*, Jg. 25, S. 329–340.
- Nachtwey, A.; Behrendt, A.; Riedel, R. (2007): Beherrschung der Variantenvielfalt mittels der Clusteranalyse. In: *ZWF*, Jg. 102, H. 7-8, S. 446–450.
- Nöth, G. (2004): Optimierung der automobilen Wertschöpfungskette mit Hilfe eines genetischen Algorithmus. Shaker, Aachen.
- Petersen, T. (2005): Organisationsformen der Montage: Theoretische Grundlagen, Organisationsprinzipien und Gestaltungsansatz. Shaker, Aachen.
- Piller, F. (2006): Mass Customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. 4. überarb. und erw. Auflage. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Pibernik, R. (2001): Flexibilitätsplanung in Wertschöpfungsnetzwerken. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Pruscha, H. (2006): Statistisches Methodenbuch: Verfahren, Fallstudien, Programmcodes. Springer, Berlin.
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (1985): Methodenlehre der Planung und Steuerung. 4. Auflage. Carl Hanser, München.
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (1993): Lexikon der Betriebsorganisation. Carl Hanser, München.
- Rixen, I. (1997): Maschinenbelegungsplanung mit evolutionären Algorithmen. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Rosenberg, O. (1996): Variantenfertigung. In: Kern, W.; Schröder H.-H.; Weber J. (Hg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. 2. völlig neu gestaltete Auflage. Schaeffer-Poeschel, Stuttgart, S. 2119–2129.
- Santoso, T.; Ahmed, S.; Goetschalckx, M.; Shapiro, A. (2005): A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. In: *European Journal of Operational Research*, Jg. 167, S. 96–115.
- Savelsbergh, M. (1997): A Branch and Price Algorithm for the Generalized Assignment Problem. In: *Operations Research*, Jg. 45, S. 831–841.

- Schmidt, V. (1990): Entwicklung und Planung gruppenorientierter Arbeitsstrukturen für die Montage komplexer und variantenreicher Produkte in der Automobilproduktion. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Schuh, G.; Harre, J.; Gottschalk, S.; Kampker, A. (2004): Design for Changeability (DFC) – Das richtige Maß an Wandlungsfähigkeit finden. In: *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 94, H. 4, S. 100–105.
- Schulte, C. (1989): Produzieren Sie zu viele Varianten? In: *Harvard Manager*, Jg. 11, H. 2, S. 60–66.
- Sethi, A. K.; Sethi, S. P. (1990): Flexibility in Manufacturing Systems: A Survey. In: *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Jg. 2, H. 4, S. 289–328.
- Shanker, K.; Agrawal, A. (1997): Models and solution methodologies for the generalized grouping problem in cellular manufacturing. In: *International Journal of Production Research*, Jg. 35, H. 2, S. 513–538.
- Skinner, W. (1974): The Focused Factory. In: *Harvard Business Review*, Jg. 52, H. 3, S. 113–121.
- Sodeur, W. (1974): Empirische Verfahren zur Klassifikation. Teubner, Stuttgart.
- Steinhausen, D.; Langer, K. (1977): Clusteranalyse: Einführung in Methoden und Verfahren der automatischen Klassifikation. De Gruyter, Berlin.
- Suhl, L.; Mellouli, T. (2006): Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. Springer, Berlin.
- Tan, P.-N.; Steinbach, M.; Kumar, V. (2006): Introduction to data mining. Pearson/Addison-Wesley, Boston.
- Teich, T. (1998): Optimierung von Maschinenbelegungsplänen unter Benutzung heuristischer Verfahren. Eul, Lohmar.
- Thomopoulos, N. T. (1967): Line balancing-sequencing for mixed-model assembly. In: *Management Science*, Jg. 14, H. 2, S. 59–75.
- Till, J. (2007): New hybrid evolutionary algorithms for chemical batch scheduling under uncertainty. Shaker, Aachen.
- Till, J.; Sand, G.; Engell, S. (2006): Stochastic integer programming in chemical batch scheduling: evolution strategies vs. exact algorithms. In: 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering (ESCAPE/PSE 2006), S. 1967–1972.
- Tonigold, C. (2007): Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten. Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, Paderborn.
- Trautmann, N. (2001): Anlagenbelegungsplanung in der Prozessindustrie. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.

- Vollmer, E.; Bertagnolli, P. (1994): Das Umfeld muss stimmen – Produktionsbereiche planen und gestalten. In: Der Teamleiter. Loseblattsammlung. Raabe, Stuttgart.
- Warnecke, H.-J. (1992): Die fraktale Fabrik – Revolution der Unternehmenskultur. Springer, Berlin.
- Wildemann, H. (1995): Komplexitätsmanagement in der Fabrikorganisation. In: ZWF, Jg. 90, H. 1-2, S. 21–26.
- Wildemann, H. (2004): Variantenmanagement – Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung in Produkt und Prozess. 12. Auflage. TCW Transfer-Centrum, München.
- Willnecker, U. (2001): Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen. Herbert Utz, München.
- Zäpfel, G. (1989): Taktisches Produktions-Management. De Gruyter, Berlin.
- Zeile, U. (1995): Montagestrukturplanung für variantenreiche Serienprodukte. Springer, Berlin.