

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Betriebswirtschaftslehre  
Fachgebiet Fertigungs- und Materialwirtschaft  
Prof. Dr. H. Stadler



Diplomarbeit

# **Optimierung von Sicherheitsbeständen in Supply Chains mit Simulation**

Betreuung:  
Prof. Dr. H. Stadler

Vorgelegt von:  
Steffen Bickel

Darmstadt, 12. September 2002

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Hintergrund .....	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	1
<b>2</b>	<b>Planung in Supply Chains unter Unsicherheit</b> .....	<b>3</b>
2.1	Planung in Supply Chains .....	3
2.2	Unsicherheit in Supply Chains.....	5
2.2.1	Quellen von Unsicherheit .....	5
2.2.2	Auswirkungen von Unsicherheit .....	6
2.2.3	Maßnahmen gegen Unsicherheit .....	8
<b>3</b>	<b>Bestimmung von Sicherheitsbeständen</b> .....	<b>10</b>
3.1	Grundlagen von Bestimmungsverfahren.....	10
3.2	Prämissen der Bestimmung.....	13
3.3	Bestimmung ohne Flexibilisierung .....	15
3.3.1	Unabhängigkeit der Sicherheitsbestände .....	15
3.3.2	Bestimmung mittels direkter Fehlmengenerfassung.....	16
3.3.3	Bestimmung mittels linearer Optimierung .....	20
3.4	Bestimmung mit Flexibilisierung.....	21
3.4.1	Flexibilisierung durch Losgrößenanpassung.....	21
3.4.2	Konsequenzen für die Sicherheitsbestandsbestimmung .....	24
3.4.3	Substitution der Lagerbestandsarten .....	25
<b>4</b>	<b>Simulationssystem zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen</b> .....	<b>28</b>
4.1	Überblick .....	28
4.2	Bewertung von Sicherheitsbeständen durch Simulation .....	29
4.2.1	Begriffsbestimmung und Grundlagen.....	29
4.2.2	Aufbau des Simulationsmodells .....	30
4.2.3	Erweiterungen des Simulationsmodells.....	32
4.2.3.1	Implementierung der Flexibilisierung .....	32
4.2.3.2	Fehlmengenbehandlung als Lost-Sales und Backorders .....	40

---

4.3	Optimierung mittels genetischer Algorithmen.....	42
4.3.1	Theoretische Grundlagen.....	42
4.3.2	Genetischer Algorithmus des Ausgangssystems.....	44
4.3.3	Erweiterungen des Optimierers .....	45
4.3.3.1	Servicegrad-Nebenbedingung durch Strafkostenfunktion .....	45
4.3.3.2	Gezielte Genauigkeitsreduktion durch statistische Tests.....	48
4.3.3.3	Zusatzmodul Feinsuche .....	52
4.3.3.4	Operatoren des genetischen Algorithmus .....	55
4.4	Verifikation und Validierung des Modells.....	57
<b>5</b>	<b>Experimentelle Analyse von Wirkungszusammenhängen bei der Sicherheitsbestandsbestimmung .....</b>	<b>60</b>
5.1	Vorbereitung und Durchführung der Untersuchung .....	60
5.1.1	Vorbereitung der Testinstanzen.....	60
5.1.2	Parameter für Simulation und Optimierer .....	62
5.1.3	Berechnung der Kennzahlen .....	63
5.1.4	Durchführung.....	68
5.2	Auswertung der Ergebnisse .....	69
5.2.1	Bestimmung ohne Flexibilisierung .....	69
5.2.2	Bestimmung mit Flexibilisierung.....	77
5.2.3	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.....	84
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>86</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>90</b>
	<b>Anhang A: Wichtige Veränderungen im Quellcode .....</b>	<b>93</b>
	<b>Anhang B: LP-Modell zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen .....</b>	<b>96</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Supply Chain Planning Matrix (SCP-Matrix) .....	3
Abbildung 2: Sicherheitsbestand und Beta-Servicegrad .....	11
Abbildung 3: Sicherheitsbestand und Lagerkosten .....	11
Abbildung 4: Saisonbestand, Nachfrage und Auslastung .....	26
Abbildung 5: Schematische Architektur des Simulators .....	31
Abbildung 6: Sicherheitsbestandsverlauf ohne zusätzliche Auffüllhöhe .....	35
Abbildung 7: Sicherheitsbestandsverlauf mit zusätzlicher Auffüllhöhe .....	35
Abbildung 8: Ablauf der Losgrößenanpassung für eine Ressource .....	37
Abbildung 9: Servicegrad-Nebenbedingung .....	47
Abbildung 10: Ablauf der Feinsuche .....	54
Abbildung 11: Produktionsstrukturen des Modells A+ .....	61
Abbildung 12: Auf- und Abbau von Saisonbestand .....	67

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fehlmengen .....	17
Tabelle 2: Kumulierte Fehlmengen.....	17
Tabelle 3: Fehlmengen - zusammengefasst, kumuliert und sortiert .....	17
Tabelle 4: Berechnung von Sicherheitsbeständen für $\beta$ -Servicegrad.....	19
Tabelle 5: Beispiel – Backorders ohne Sicherheitsbestand.....	20
Tabelle 6: Beispiel – Backorders mit Sicherheitsbestand = 1 .....	20
Tabelle 7: Verschiedene Zufallsströme.....	69
Tabelle 8: Ergebnisse – Lost Sales und Backorders – starre Produktion .....	70
Tabelle 9: Vorzeichenrangtest – Lost-Sales und Backorders .....	71
Tabelle 10: Ergebnisse – Generelle und konv. Struktur – starre Produktion.....	71
Tabelle 11: Ergebnisse – Variationskoeffizient der Nachfrage – starre Produktion	72
Tabelle 12: Vorzeichenrangtest – Variationskoeffizient der Nachfrage .....	73
Tabelle 13: Ergebnisse – Auslastungsgrad – starre Produktion.....	73
Tabelle 14: Ergebnisse – Zeit zwischen Losauflagen – starre Produktion .....	75
Tabelle 15: Vorzeichenrangtest – Zeit zwischen Losauflagen.....	75
Tabelle 16: Ergebnisse – Saisonaler Nachfrageverlauf – starre Produktion.....	76
Tabelle 17: Vorzeichenrangtest – Saisonaler Nachfrageverlauf S0/S1 .....	76
Tabelle 18 Vorzeichenrangtest – Saisonaler Nachfrageverlauf S0/S2.....	77
Tabelle 19: Ergebnisse – Vorlaufzeit – starre Produktion.....	77
Tabelle 20: Ergebnisse – ohne/mit Flexibilisierung .....	78
Tabelle 21: Ergebnisse – Lost Sales und Backorders – flexibilisierte Produktion....	81
Tabelle 22: Ergebnisse – Auslastungsgrad – flexibilisierte Produktion .....	82
Tabelle 23: Ergebnisse – Zeit zwischen Losauflagen – flexibilisierte Produktion ...	83
Tabelle 24: Ergebnisse – Saisonaler Nachfrageverlauf – flexibilisierte Produktion	83
Tabelle 25: Ergebnisse – Vorlaufzeit – flexibilisierte Produktion .....	84

---

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BO	Backorders
bzw.	Beziehungsweise
CSV	Comma Separated Values
DNA	Desoxynucleoacid
GA	Genetischer Algorithmus
GE	Geldeinheit
LS	Lost-Sales
MIP	Mixed Integer Programming
MLCLSP	Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem
MRP	Material Requirements Planning
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
SB	Sicherheitsbestand
SG	Servicegrad
SC	Supply Chain
usw.	und so weiter
Vgl.	Vergleiche
z.B.	zum Beispiel

## Symbolverzeichnis

$BO_{jts}$	Backorders für Produkt j, Periode t in Umweltlage s
$\beta_j$	$\beta$ -Servicegrad für Produkt j
$C_{prim}^{Los}$ bzw. $C_{sek}^{Los}$	Lagerkosten für Losgrößenbestand, kumuliert über alle Produkte mit Primär- bzw. Sekundärbedarf (Definition in Kapitel 5.1.3)
$C_{prim}^{Rest}$ bzw. $C_{sek}^{Rest}$	Lagerkosten für alle Bestände, die nicht Sicherheitsbestände sind, kumuliert über alle Produkte mit Primär bzw. Sekundärbedarf (Definition in Kapitel 5.1.3)
$C_{prim}^{Saison}$ bzw. $C_{sek}^{Saison}$	Lagerkosten für Saisonbestand, kumuliert über alle Produkte mit Primär- bzw. Sekundärbedarf (Definition in Kapitel 5.1.3)
$C_{prim}^{SB}$ bzw. $C_{sek}^{SB}$	Lagerkosten für Sicherheitsbestände, kumuliert über alle Produkte mit Primär- bzw. Sekundärbedarf (Definition in Kapitel 5.1.3)
$C^{Total}$	Gesamtlagerkosten (Definition in Kapitel 5.1.3)
(+ / -)	Konfidenzintervall für Gesamtlagerkosten
$Cap_{mt}$	Kapazität einer Produktionsressource m in Periode t
$D_{jts}$	Ausprägung einer Nachfrage in der Simulation für Produkt j, Periode t und Umweltlage s
$D_{jt}^{kumabw}$	Kumulierte Nachfrageabweichungen für Produkt j und Periode t
$\bar{D}_j^{MIP}$	Der Mittelwert über alle im MIP verwendeten Nachfragen (Primär- und Sekundärnachfragen) für Produkt j
$h_j$	Lagerkostensatz für Produkt j

---

$I_{jts}$	Lagerendbestand für Produkt $j$ , in Periode $t$ und Umweltlage $s$
$j = 1, \dots, J$	Produkte
$LS_{js}$	Kumulierte Fehlmengen über einen ganzen Planungszeitraum für Produkt $j$ und Umweltlage $s$
$LS_{jts}$	Fehlmenge für Produkt $j$ , Periode $t$ in Umweltlage $s$
$LS_{jts}^{kum}$	Kumulierte Fehlmengen der vorherigen Perioden für Produkt $j$ , Periode $t$ in Umweltlage $s$
$LS_{jt}^{kumsort}$	Die zusammengefassten und sortierten Fehlmengen über alle Umweltlagen für Produkt $j$ und Periode $t$
$LS_j^{\max}$	Maximal erlaubte Fehlmenge um einen vorgegebenen Servicegrad nicht zu unterschreiten
$m = 1, \dots, M$	Ressourcen
$n = 1, \dots, N$	Testfälle innerhalb einer bestimmten Gruppe
$\bar{p}_j^{best}$	Mittlere Nachfrage in Simulation für Produkt $j$
$p^{flex-starr}$	Prozentuale Verbesserung der Gesamtlagerkosten durch Flexibilisierung (Definition in Kapitel 5.1.3)
$p_{prim}^I$	Anteil aller Perioden, deren Lagerendbestand $> 5\%$ des mittleren Bedarf ist (Definition in Kapitel 5.1.3)
$\bar{p}_j^{plan}$	Mittlere Nachfrage für Produkt $j$ , auf deren Basis der Produktionsplan erstellt wird.
$p_m^{Schlupf}$	Anteil der Perioden, deren Schlupfkapazität $> 2\%$ der Periodenkapazität von Ressource $m$ ist (Definition in Kapitel 5.1.3)

---

$p_{prim}^X$	Anteil der Perioden, in denen ein Los aufgelegt wird (Definition in Kapitel 5.1.3)
$p_{prim}^X$ bzw. $p_{sek}^X$	Anteil der Perioden, in denen ein Los aufgelegt wird, im Mittel über alle Produkte mit Primär- bzw. Sekundärbedarf (Definition in Kapitel 5.1.3)
$p_{prim}^{\#Xflex}$ bzw. $p_{sek}^{\#Xflex}$	Anteil aller Lose, die durch Flexibilisierung variiert wurden, im Mittel über Produkte mit Primär bzw. Sekundärbedarf (Definition in Kapitel 5.1.3)
$p_{prim}^{\Delta XflexAbs}$ bzw. $p_{sek}^{\Delta XflexAbs}$	Prozentuale absolute Veränderung der Losgrößen durch Flexibilisierung, im Mittel über alle Produkte mit Primär- bzw. Sekundärbedarf (Definition in Kapitel 5.1.3)
$P_{jts}$	Ausprägung einer Primärnachfrage in der Simulation für Produkt j
$s = 1, \dots, S$	Umweltlagen
$SS_j^1$ und $SS_j^2$	erstes und zweites Sicherheitsbestandsniveau für Produkt j
$t = 1, \dots, T$	Perioden
$X_{jt}^{MIP}$	Losgröße aus dem MIP-Produktionsplan für Produkt j und Periode t
$\Delta X_{jts}$	Änderung der Losgröße durch Flexibilisierung für Produkt j, Periode t in Umweltlage s

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Die Dynamik der betrieblichen Umwelt und größerer Konkurrenzdruck durch eine Globalisierung der Märkte haben in den letzten Jahren Unternehmen zu einer Umorientierung gezwungen. Es reicht nun nicht mehr aus, den Fokus des betrieblichen Managements auf die Planung, Kontrolle und Optimierung einer einzelnen Wertschöpfungsstufe zu setzen. Statt dessen ist eine stufenübergreifende Sichtweise der Wertschöpfungskette (Supply Chain) und Kooperation zwischen den einzelnen Teilnehmern nötig. Ermöglicht wurde diese Entwicklung erst durch den technologischen Fortschritt der jüngsten Vergangenheit, denn um eine effektive Kommunikation zwischen allen Kettengliedern sicherzustellen, ist eine leistungsfähige Informationstechnologie unabdingbar.

Eines der Probleme, die Unternehmen nun im Rahmen einer Supply Chain kooperativ lösen können, ist das Management von Unsicherheiten.

Unsicherheitsmanagement kann sich schon für Unternehmen auf *einer* Wertschöpfungsstufe als nicht trivial erweisen, deshalb wirft eine Supply Chain-übergreifende Betrachtung von Unsicherheit komplexe Probleme auf.

Da sich Unternehmen von der erfolgreichen Lösung dieser komplexen Probleme enorme Vorteile versprechen, finden diese Ansätze in der betrieblichen Praxis und auch in der Wissenschaft in letzter Zeit verstärkt Beachtung.

Eine Maßnahme im Rahmen des Supply Chain-übergreifenden Unsicherheitsmanagement ist die koordinierte Bestimmung und Verwendung von Sicherheitsbeständen. Bei der Bestimmung von Sicherheitsbeständen stellt sich das Problem, die einzelnen Sicherheitsbestände in der Supply Chain so groß zu wählen, dass sie einerseits ihren Zweck im Rahmen des Unsicherheitsmanagement erfüllen und andererseits wenig zusätzliche Kosten verursachen.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Verfahren zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen in Supply Chains zu entwerfen und weiterzuentwickeln, deren zentrale Methode die Simulation ist. Eine hohe Effektivität und Zuverlässigkeit der Verfahren ist anzustreben, so dass praxisnahe Einsatzmöglichkeiten offen

---

stehen. Zu diesem Zweck soll die Leistungsfähigkeit der entwickelten Verfahren experimentell untersucht und die Einflüsse bestimmter Rahmenbedingungen analysiert werden.

Im folgenden wird die Vorgehensweise und der Aufbau der Arbeit verdeutlicht:

Zuerst beschreibt Kapitel 2.1, wie Unsicherheit bei Planungsaktivitäten in einer Supply Chain berücksichtigt wird. Danach werden in Kapitel 2.2 Grundlagen von Unsicherheit in Supply Chains vermittelt. Es geht um die Quellen, Auswirkungen und schließlich um Maßnahmen gegen Unsicherheit. Als eine mögliche Maßnahme werden Sicherheitsbestände erkannt.

Das folgende Kapitel 3 widmet sich dann ganz der Bestimmung von Sicherheitsbeständen. Dazu werden in den Kapiteln 3.1 und 3.2 Grundlagen und Prämissen der Bestimmung von Sicherheitsbeständen herausgestellt. Des Weiteren wird in Kapitel 3.3 die Bestimmung von Sicherheitsbeständen mit starren Produktionsplänen beschrieben. Im nächsten Kapitel 3.4 wird dann diese Beschränkung aufgehoben. Es werden Ansätze zur Flexibilisierung von Produktionsplänen gezeigt und die Auswirkungen auf die Bestimmung von Sicherheitsbeständen diskutiert.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der simulativen Bestimmung von Sicherheitsbeständen. Das beschriebene Simulationssystem besteht einerseits aus einem Simulationsmodell (Kapitel 4.2) und andererseits aus einem Optimierer (Kapitel 4.3). Im Rahmen dieser beiden Kapitel werden jeweils zuerst Grundlagen und dann Erweiterungen und Verbesserungen einer vorhandenen Simulationssoftware beschrieben. Kapitel 4.4 enthält Überlegungen zur Korrektheit der Simulation.

In Kapitel 5 wird experimentell gezeigt, dass die entwickelten Verfahren unter verschiedenen Rahmenbedingungen einsetzbar sind. Zusätzlich wird untersucht, welche Wirkung bestimmte Rahmenbedingungen auf die Kosten für Sicherheitsbestände haben. Informationen zur Vorbereitung und Durchführung der Experimente können Kapitel 5.1 entnommen werden. Die Präsentation und Auswertung der Ergebnisse enthält dann Kapitel 5.2.

Mit einem Fazit und einem Ausblick auf mögliche weiterführende Untersuchungen beschließt Kapitel 6 die Arbeit.

## 2 Planung in Supply Chains unter Unsicherheit

In diesem Kapitel wird mit Abschnitt 2.1 zuerst vermittelt, welche Planungsaufgaben in Supply Chains zu bewältigen sind und welche Zusammenhänge dabei relevant sind. In Abschnitt 2.2 werden die Quellen und Auswirkungen von Unsicherheit in Supply Chains beleuchtet und schließlich einige Gegenmaßnahmen dargestellt.

### 2.1 Planung in Supply Chains

Eine Supply Chain wird definiert als ein „... network of organizations that are involved, through upstream and downstream linkages, in the different processes and activities that produce value in the form of products and services in the hands of the ultimate customer.“<sup>1</sup>

Um ein solches Netzwerk aus vielen Organisationen zu koordinieren, deren Prozesse und Aktivitäten aufeinander abzustimmen, so dass sich für alle Teilnehmer des Netzwerks und auch für den Endkunden Vorteile aus der Kooperation ergeben, ist eine schwierige Aufgabe, die nur mit umfangreicher Planung erreichbar ist.

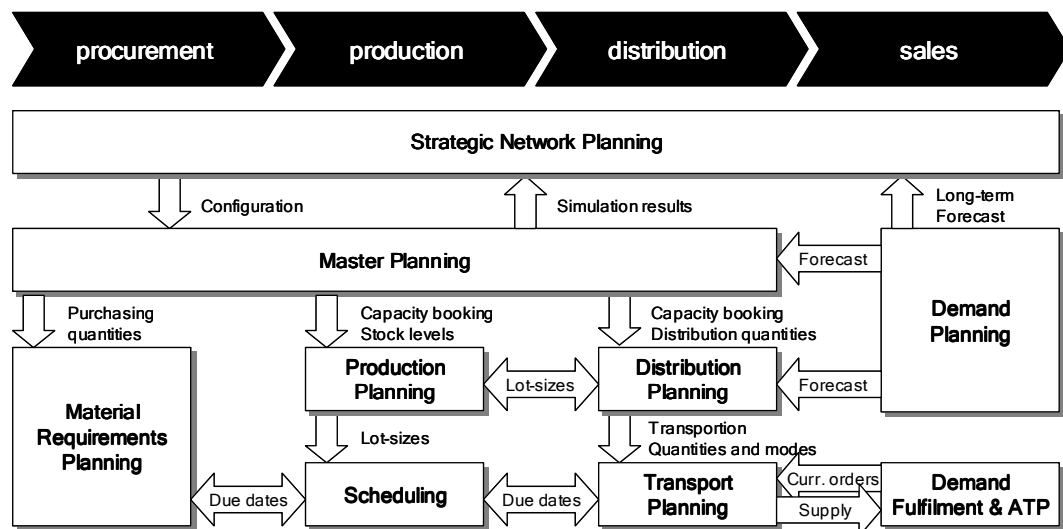


Abbildung 1: Supply Chain Planning Matrix (SCP-Matrix)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Christopher (1998), S. 15.

<sup>2</sup> Rohde (2000), S. 184.

Die Planungsaufgaben innerhalb einer Supply Chain werden in Abbildung 1 strukturiert dargestellt.

Die vertikale Dimension bildet den Planungshorizont (kurz-, mittel und langfristig) und die horizontale die vier Hauptprozesse einer Supply Chain (Beschaffung, Produktion, Distribution und Vertrieb) ab.

Im Rahmen dieser Arbeit sind die Bereiche *Demand Planning*, *Distribution Planning*, *Master Planning*, *Production Planning* und *Scheduling* von Bedeutung.

Im *Demand Planning* wird versucht die zukünftige Nachfrage zu prognostizieren. Mittelfristige Planungszahlen für die Nachfrage werden an das *Master Planning* weitergegeben und dort ein Master Plan für Produktion, Distribution und Beschaffung für einen mittelfristigen Planungszeitraum zusammengestellt. Eine Hauptaufgabe des *Master Planning* ist, Kapazitätskosten und (Saison-) Lagerbestände ins Gleichgewicht zu bringen. Der Master Plan ist nicht detailliert genug, um Informationen über einzelne Lose zu beinhalten. *Production Planning* und *Scheduling* haben die Aufgabe, mit dem Master Plan als Rahmen, Losgrößen und Maschinenbelegung festzulegen. Hier müssen Rüstkosten (losfixe Kosten) und Lagerkosten ausbalanciert werden. Im *Distribution Planning* werden aufgrund der geplanten Nachfragen die benötigten Lagerbestandshöhen und der Transport zwischen Lagern geplant.<sup>3</sup>

Die Auswirkungen von Zufallseinflüssen bzw. Unsicherheiten im Nachfrageverlauf werden im *Demand Planning* versucht zu berücksichtigen. Die Unsicherheiten sollen dort quantifiziert und in Koordination mit den anderen oben genannten Planungsbereichen unter Kontrolle gebracht werden.<sup>4</sup>

Wie sich in den nächsten Abschnitten zeigen wird, existieren außer der Unsicherheit bezüglich der Nachfrage noch weitere Unsicherheitsfaktoren. Die Planung hinsichtlich dieser anderen Unsicherheitsfaktoren lässt sich leider nicht eindeutig in die SCP-Matrix einordnen. Eine Erweiterung um eine prozessübergreifende Planungsinstanz zur Berücksichtigung von Unsicherheit wäre sinnvoll.

---

<sup>3</sup> Vgl. Fleischmann / Meyr / Wagner (2000), S. 62-66.

<sup>4</sup> Vgl. Wagner (2000), S. 97.

Welche Quellen von Unsicherheit in Supply Chains unterschieden werden können, wie diese sich auswirken und welche Maßnahmen dagegen eingesetzt werden können, ist Inhalt des nun folgenden Kapitels.

## 2.2 Unsicherheit in Supply Chains

### 2.2.1 Quellen von Unsicherheit

Im Gegensatz zu deterministischen, treten bei stochastischen Kenngrößen Abweichungen von erwarteten Werten auf. Solche potentiellen Abweichungen werden als Unsicherheit bezeichnet.

Im folgenden werden verschiedene in der Literatur zu findende Klassifikationen und damit auch Quellen von Unsicherheit vorgestellt. Die einzelnen Klassifikationsgruppen sind teilweise ähnlich.

Wagner unterscheidet zwischen zwei Hauptquellen von Unsicherheit in Supply Chains – die *Prozessunsicherheit* und die *Nachfrageunsicherheit*.<sup>5</sup>

Unter *Prozessunsicherheit* fallen beispielsweise unzuverlässige Produktionsprozesse und stochastisch schwankende Vorlaufzeiten.

Unter Vorlaufzeit wird die Zeit verstanden, die zwischen Bestellung und Auslieferung eines Produkts vergeht. Es ist die Zeit, die eine Bestellung für ein Vorprodukt „vorlaufen“ muss, damit es für eine Weiterproduktion rechtzeitig zur Verfügung steht. In der Vorlaufzeit enthalten sind Bestellzeiten, Warte- und Liegezeiten, Produktions- und Rüstzeiten und Transportzeiten.<sup>6</sup>

Bei schwankenden Vorlaufzeiten ist die Bezugsgröße die Zeit, bei der Unzuverlässigkeit von Produktionsprozessen sind außerdem Menge und Qualität relevant. Zeitliche Unzuverlässigkeit von Produktionsprozessen spiegelt sich auch in schwankenden Vorlaufzeiten wieder.

Wenn die Kundennachfrage stochastisch unerwartet verläuft, spricht man von *Nachfrageunsicherheit*. Dies kann sowohl eine mengenmäßige Veränderung, als auch zeitliche Verschiebungen betreffen.

---

<sup>5</sup> Vgl. Wagner (2000), S. 97.

<sup>6</sup> Vgl. Glaser / Geiger / Rohde (1991), S. 48 und Minner (2000), S. 19f.

Unsicherheit kann auch differenziert werden in *ressourcenbezogene* und *produktbezogene* Unsicherheit. Erstere betrifft die Aktionen und Prozesse, die Ressourcen betreffen. Diese Unsicherheit kann auf alle Produkte wirken, die auf der betroffenen Ressource gefertigt werden. Produktbezogene Unsicherheit betrifft nur die Eigenschaften eines Produkts.<sup>7</sup>

Eine weitere mögliche Klassifizierung ist nach *Input-*, *Output-* und *Informationsunsicherheit*:<sup>8</sup>

*Inputunsicherheit* wirkt auf die Verfügbarkeit von für einen Arbeitsgang benötigte Vorprodukte und Produktionsressourcen.

*Outputunsicherheit* umfasst die Unsicherheit bezüglich der Endnachfrage aber auch deren Rückwirkung auf vorgelagerte Stufen. Nachfrageschwankungen, die aus Ausschuss bei der Produktion von nachfolgenden Produkten resultiert, gehören ebenfalls zur Outputunsicherheit.

*Informationsunsicherheit* betrifft die mangelnde Qualität und Quantität der verwendeten Informationen bzw. Daten für Planung, als auch für Kontrollen und den damit verbundenen Regelungsmechanismen.

### 2.2.2 Auswirkungen von Unsicherheit

Unsicherheit kann sich in den Dimensionen Zeit, Menge und Qualität auswirken. Alle drei Dimensionen können jeweils auf Input- und Outputgrößen bezogen werden. Eine eindeutige Trennung ist teilweise schwierig, denn z.B. verspätet (Zeit) gelieferte Ware kann auch als mengenmäßige Verschiebung aufgefasst werden und qualitativ minderwertige Waren könnten als Ausschuss und damit als verringerte Menge interpretiert werden.<sup>9</sup>

Messbar wird Unsicherheit durch Abweichungen der Ist-Werte von Soll- bzw. Prognosewerten. Um das Ausmaß von Unsicherheit zu beschreiben, können Streuungsmaße aus der Statistik verwendet werden.

---

<sup>7</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 352.

<sup>8</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 360f.

<sup>9</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 361f. und Inderfurth (2002), S. 3.

Abhängig vom Ausmaß der Unsicherheit können die direkten Nachteile höhere *Kosten* und schlechterer *Lieferservice* sein.<sup>10</sup>

Höhere *Kosten* können beispielsweise entstehen durch überhöhte Lagerkosten als Folge von Wartezeiten, durch Kosten für ungenutzte Ressourcen oder durch Kosten, verursacht durch nicht optimale Pläne (Informationsunsicherheit). Opportunitätskosten durch nicht angenommene Aufträge und verlorene Kunden können ebenfalls Folgen von Unsicherheit sein.

Der *Lieferservice* für Kunden kann durch einen Servicegrad ausgedrückt werden. Er ist ein Indikator für die Performance der ganzen Supply Chain. Man unterscheidet vor allem drei Definitionen, den  $\alpha$ -,  $\beta$ - und den  $\gamma$ -Servicegrad:<sup>11</sup>

Der  $\alpha$ -Servicegrad ist eine ereignisorientierte Größe. Er ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass eine Bestellung vollständig aus vorhandenem Lagerbestand befriedigt werden kann.

$$\alpha = P\{\text{Periodennachfragemenge} \leq \text{physischer Bestand zu Beginn einer Periode}\} \quad (2.1)$$

Üblicherweise bezieht sich diese Wahrscheinlichkeit auf einen bestimmten Zeitraum (z.B. Tag, Woche oder Zyklus). Soll für einen konkreten Nachfrage- bzw. Fehlmengenverlauf der  $\alpha$ -Servicegrad berechnet werden, so ergibt er sich aus dem Anteil der Zeiträume ohne Fehlmenge.

Der  $\beta$ -Servicegrad ist mengenorientiert. Er ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen direkt befriedigbarer und der gesamten Nachfrage. Im Gegensatz zum  $\alpha$ -Servicegrad spielt hier die Fehlmengenhöhe eine Rolle.

$$\beta = 1 - \frac{E\{\text{Fehlmenge pro Periode}\}}{E\{\text{Periodennachfragemenge}\}} \quad (2.2)$$

Zusätzlich zur Mengenorientierung kommt beim  $\gamma$ -Servicegrad noch eine zeitliche Komponente hinzu. Es soll damit die Höhe von Fehlmengen, als auch die Wartezeiten der zurückgestellten Aufträge berücksichtigt werden. Der  $\gamma$ -Servicegrad spielt in der betrieblichen Praxis bisher kaum eine Rolle, wird aber in theoretischen Überlegungen öfters aufgegriffen.

---

<sup>10</sup> Vgl. Inderfurth (2002), S. 3f.

<sup>11</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S.386-371 und Meyr / Rohde / Stadler / Sürle (2000), S. 35.

$$\gamma = 1 - \frac{E\{\text{Fehlbestand pro Periode}\}}{E\{\text{Periodennachfragemenge}\}} \quad (2.3)$$

### 2.2.3 Maßnahmen gegen Unsicherheit

Um die Auswirkungen von Unsicherheit zu minimieren, müssen Unsicherheitsfaktoren mit in die Planung einbezogen werden. Grundlage dafür ist eine Quantifizierung der Unsicherheit mit statistischen Methoden. Im nächsten Schritt muss eine Abschätzung bzw. Berechnung der Kosten von Unsicherheit erfolgen, um den Budgetrahmen für die nun zu planenden und zu implementierenden Strategien gegen Unsicherheit festzulegen. Sind schließlich Maßnahmen gegen Unsicherheit implementiert, muss regelmäßig deren Erfolg kontrolliert werden und bei Abweichung von geplanten Performance-Kennzahlen gegebenenfalls Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.<sup>12</sup>

Strategische Planungen und Maßnahmen sind oft Voraussetzung für ein erfolgreiches Unsicherheitsmanagement. Dabei spielt die

- (Re-)Organisation von Supply Chain-Prozessen und die
- Verbesserung von Supply Chain-übergreifenden Informationssystemen

eine wichtige Rolle.<sup>13</sup> Um als Gesamtsystem erfolgreich zu sein, müssen alle wichtigen Planungen und Aktivitäten zwischen den einzelnen Supply Chain-Teilnehmern aufeinander abgestimmt sein, dies gilt im besonderen Maße auch für das Unsicherheitsmanagement.

Zwei der wichtigsten konkreten Maßnahmen gegen Unsicherheit in mehrstufigen Produktionsprozessen sind die<sup>14</sup>

- Nutzung flexibler Planungsmethoden (z.B. rollierende Planung, Möglichkeit der Neueinplanung von Produktionsaufträgen) und die
- Verwendung von Pufferungsmechanismen

Bei rollierender Planung wird ein Hauptproduktionsplan in einen fixierten und einen vorläufig geplanten (nicht fixierten) Abschnitt aufgeteilt. Die beiden Abschnitte „rollen“ mit fortschreitender Zeit voran, so dass bei der Fixierung der

---

<sup>12</sup> Vgl. Inderfurth (2002), S. 6.

<sup>13</sup> Vgl. Inderfurth (2002), S. 6.

<sup>14</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 409.

vorher vorläufig geplanten Abschnitte immer aktuelle Entwicklungen (auch Einflüsse von Unsicherheit) berücksichtigt werden können.<sup>15</sup>

Bei der Neueinplanung von Produktionsaufträgen (rescheduling) unterscheidet man zwischen drei Varianten, um auf unerwartete Bedarfsveränderungen zu reagieren. Möglich ist die Veränderung von<sup>16</sup>

- Fertigstellungsterminen, durch Vorziehen von Produktionsaufträgen,
- der Auftragsgröße, es wird versucht eine Anpassung durch Losgrößenvariation zu erreichen,
- der Durchlaufzeit, durch Freigabe von Eilaufträgen.

Pufferungsmechanismen können in Mengen- und Zeitpuffer gegliedert werden. Ein Zeitpuffermechanismus ist die Verwendung von Sicherheitsvorlaufzeiten. Alle oder nur kritische Produktionsaufträge werden verfrüht eingeplant, um durch die zu früh im Nachfragelager eintreffenden Produkte einen zusätzlichen Puffer zum Ausgleich von zeitlichen und mengenmäßigen Nachfrageschwankungen zu erhalten.

Sicherheitsbestände sind Mengenpuffer und stellen eine einfache Möglichkeit dar, um Unsicherheit auszugleichen. Lagerbestände, die unter unsicheren Einflüssen stehen, werden um einen Sicherheitsbestand erhöht, der bei erwartungsgemäßen Lagerzugängen und -abgängen nicht angetastet wird. Sobald eine unerwartete Entwicklung eintritt, kann der Sicherheitsbestand als Puffer fungieren. Sicherheitsbestände können für Vor-, Zwischen- und Endprodukte gehalten werden und demnach Nachfrage- und Prozessunsicherheiten kompensieren. Durch Sicherheitsbestände an Vorprodukten werden auch Inputunsicherheiten abgedeckt.<sup>17</sup>

---

<sup>15</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 409.

<sup>16</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 434f.

<sup>17</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 410-432.

### 3 Bestimmung von Sicherheitsbeständen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Bestimmung von Sicherheitsbeständen unter verschiedenen Rahmenbedingungen. In Abschnitt 3.1 werden kurz die Grundlagen von Bestimmungsverfahren vermittelt. Abschnitt 3.2 nennt dann alle im Rahmen dieser Arbeit wichtigen Prämissen der Sicherheitsbestandsbestimmung. In den Abschnitten 3.3 und 3.4 werden zuerst Verfahren zur Sicherheitsbestandsbestimmung mit starren und dann mit flexiblen Produktionsplänen beschrieben bzw. Grundlagen für folgende Kapitel gelegt.

#### 3.1 Grundlagen von Bestimmungsverfahren

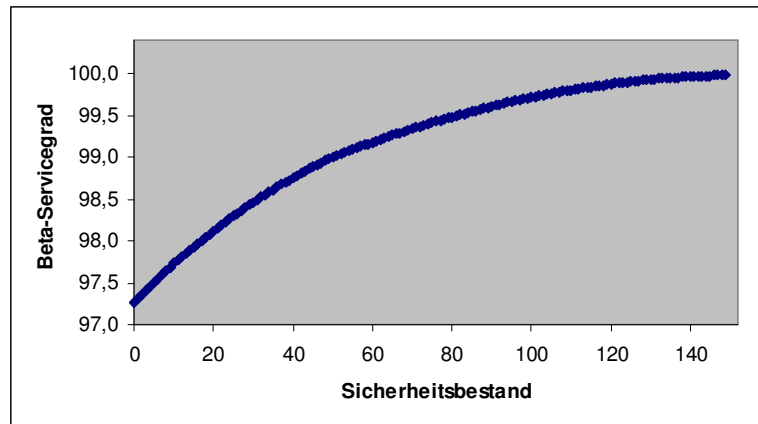
Sicherheitsbestände dienen der Kompensation unerwarteter Schwankungen von Lagerzugängen und –abgängen. Je höher ein Sicherheitsbestand ist, desto besser funktioniert diese Kompensationswirkung. Allerdings verursachen hohe Sicherheitsbestände auch hohe Lagerkosten (Kapitalbindungskosten). Es besteht somit ein Zielkonflikt aus Folgekosten von nicht kompensierten Schwankungen und den Lagerkosten für Sicherheitsbestände. Da sich Folgekosten von nicht kompensierten Schwankungen schwierig quantifizieren lassen, spielt der in Kapitel 2.2.2 eingeführte Servicegrad zur Beurteilung des Lieferservice eine wichtige Rolle. Die Zusammenhänge der drei Größen Sicherheitsbestandshöhe, Servicegrad und Lagerkosten werden beispielhaft in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt. Bei den Lagerkosten handelt es sich nur um die Lagerkosten für den Sicherheitsbestand. Die Diagrammdaten sind mit der in Kapitel 4.2 beschriebenen Simulation erstellt.<sup>18</sup>

Der erwähnte Zielkonflikt ist aus den Abbildungen ersichtlich, ein hoher Servicegrad mit einem hohen Sicherheitsbestandslevel verursacht hohe Lagerkosten für Sicherheitsbestände.

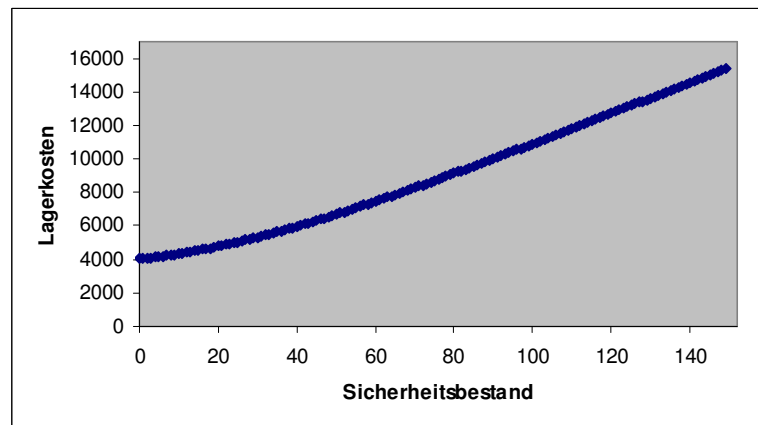
Um diesen Zielkonflikt zu lösen, wird im weiteren Verlauf der Arbeit davon ausgegangen, dass zu einem fest vorgegebenen Mindest-Servicegrad Sicherheitsbestände mit minimalen Lagerkosten bestimmt werden sollen.

---

<sup>18</sup> Es handelt sich um den Sicherheitsbestand für Produkt 1 des Modells A+ G001130 mit starrem Produktionsplan. Näheres zu der Modellstruktur kann in Kapitel 5 nachgelesen werden.



**Abbildung 2:** Sicherheitsbestand und Beta-Servicegrad



**Abbildung 3:** Sicherheitsbestand und Lagerkosten

Die Verfahren zur Sicherheitsbestandsbestimmung werden von der Grundkonzeption der Informations- und Materialflüsse einer Supply Chain determiniert. Drei unterschiedliche Ansätze werden hier kurz vorgestellt:<sup>19</sup>

- Einstufige stochastische Lagerhaltungspolitiken
- Mehrstufige stochastische Lagerhaltungspolitiken
- Material Requirements Planning

Zu unterscheiden sind zuerst zentrale und dezentrale Maßnahmen gegen Unsicherheit. Als dezentrale Maßnahmen gegen Unsicherheit sind einstufige stochastische Lagerhaltungspolitiken zu nennen. Diese betrachten jedes Produkt isoliert, unter Vernachlässigung von vorhandenen Beziehungen zu anderen

---

<sup>19</sup> Vgl. Minner (2000), S. 68f.

Produkten. Durch Festlegung von Bestellpunkten, -höhen und/oder -zeitpunkten, können Sicherheitsbestände stochastische Nachfrageeinflüsse so ausgleichen, dass Fehlmengen nur begrenzt auftreten.<sup>20</sup>

Diese Verfahren sind gut erforscht und werden wahrscheinlich deshalb und weil sie kaum Koordination und Informationsaustausch zwischen einzelnen Stufen erfordern auch in der Praxis für Supply Chains verwendet. Damit kann allerdings kaum von einer kostenminimalen Lösung gesprochen werden. Wenn beispielsweise jede Stufe entlang der Kette isoliert versucht, mit Sicherheitsbeständen Unsicherheitsfaktoren zu kontrollieren, entstehen unnötig hohe Gesamtsicherheitsbestände, denn die Möglichkeit des Ausgleichs der Unsicherheit zwischen verschiedenen Stufen werden ignoriert.<sup>21</sup> Mit koordinierter Disposition besteht folglich Kostensenkungspotential.

Um das Konzept der einstufigen Lagerhaltungspolitiken auf mehrere Stufen zu erweitern, können anstelle von lokalen Lagerbeständen systemweite Lagerbestände betrachtet werden. Dabei werden alle sich im System befindlichen Mengen eines Produkts mit einbezogen, unabhängig davon, ob das Produkt noch physisch identifizierbar oder in weiterverarbeiteter Form vorliegt.<sup>22</sup> Informationen werden zentral gesammelt und auf deren Basis Entscheidungen getroffen, die dezentral implementiert werden.

Die Probleme, die von einer solchen mehrstufigen stochastischen Lagerhaltungspolitik zu lösen sind, sind zum einen die Festlegung und Steuerung der Höhe des systemweiten Sicherheitsbestands und zum anderen deren optimale Verteilung über die Supply Chain. Einer der ersten grundlegenden Ansätze auf diesem Gebiet ist von Clark und Scarf (1960), die Lösungen für serielle Strukturen beschreiben. Viele der darauffolgenden Veröffentlichungen sind Erweiterungen und Verbesserungen dieser Ideen.<sup>23</sup>

Im Gegensatz zu stochastischen Lagerhaltungspolitiken ist das Konzept der Material Requirements Planning (MRP) für deterministische Herstellungsprozesse entworfen, um im Rahmen einer make-to-order Produktion einen

---

<sup>20</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 351, 362f.

<sup>21</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 351.

<sup>22</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 194.

<sup>23</sup> Vgl. Axsäter (2000), S. 149-151 und Minner (2000), S. 70-73.

Produktionsplan festzulegen. Die vorhandenen Bestellungen müssen dabei unter Berücksichtigung der gesamten Systemvorlaufzeit erfüllt werden. Ein wichtiger Unterschied zu Lagerhaltungspolitiken ist, dass hier die Nachfrage nicht stationär sein muss.

Die zwangsweise in der Praxis auftretenden Abweichungen von deterministischen Plänen sollen mittelfristig mit rollierender Planung ausgeglichen werden. Eine Möglichkeit, kurzfristige Unsicherheit aufzufangen, sind Sicherheitsbestände und flexibilisierte Produktion durch Neueinplanung von Aufträgen (siehe auch Kapitel 2.2.3).<sup>24</sup>

Der Schwerpunkt der weiteren Untersuchung liegt zum einen auf der Bestimmung von Sicherheitsbeständen für starre Produktionspläne, zum anderen auf der Steuerung der Neueinplanung von Produktionsaufträgen mit veränderten Auftragsgrößen und der Bestimmung dazu passender Sicherheitsbestände. Neueinplanung von Produktionsaufträgen wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Flexibilisierung (der Produktion) bezeichnet.

### **3.2 Prämissen der Bestimmung**

Im Rahmen dieser Arbeit wird bei der Bestimmung von Sicherheitsbeständen von folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

- Es liegt ein fester Produktionsplan vor. Dieser legt für den vollständigen Planungszeitraum fest, wie viel von einem Produkt zu welcher Zeit auf welcher Ressource gefertigt werden soll. Der Plan muss gewährleisten, dass immer jeweils alle für die Produktion eines Produkts benötigten Vorprodukte in der entsprechenden Anzahl und unter Berücksichtigung der gegebenen Vorlaufzeit an der richtigen Ressource zur Verfügung stehen.
- Es liegt ein endlicher Planungshorizont vor, der durch die Reichweite des Produktionsplans bestimmt wird.
- Betrachtet werden mehrstufige Produktionsstrukturen ohne Zyklen. Für die Beziehungen zwischen Produkten sind konstante Direktbedarfskoeffizienten gegeben.

---

<sup>24</sup> Vgl. Axsäter (2000), S. 126-133, und Minner (2000), S. 74-76.

- Vor-, Zwischen- und Endprodukte können jeweils nur auf einer bestimmten Produktionsressource gefertigt werden.
- Es liegt unabhängige stochastische Nachfrage für Endprodukte vor, die auch saisonalen Schwankungen unterliegen kann. Dies ist die einzige Unsicherheit im System.
- Eine Primärnachfrage ist erst am Ende einer Periode bekannt. Alle Planungen die am Anfang einer Periode stattfinden, können nur auf der erwarteten Nachfrage basieren.
- Für den Fall, dass immer die erwarteten Endnachfragen auftreten, treten keine Fehlmengen auf.
- Auftretende Fehlmengen werden entweder nach dem Lost-Sales-Prinzip (Nachfrageverlust) oder dem Backorder-Prinzip (Nachlieferung) behandelt. Lost-Sales bedeutet, dass Kunden nicht fristgerecht gelieferte Waren zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr annehmen. Fristgerechte Teillieferungen sollen aber angenommen werden. Backorder bedeutet, dass alle nicht fristgerechten Lieferungen nachgeliefert werden müssen und vom Kunden noch angenommen werden. In der Praxis liegt meistens eine Mischung der beiden Prinzipien vor.<sup>25</sup>
- Fehlmengen sollen begrenzt auftreten. Um den Service-Level zu quantifizieren, wird ein bestimmter  $\beta$ -Servicegrad vorgegeben, der nicht unterschritten werden darf.
- Lagerbestandshöhen und damit auch die Lagerkosten werden approximativ über den Endbestand in einer Planungsperiode bestimmt.
- Lagerkostensätze werden über den Wert des jeweiligen Produkts festgelegt. Jede Produktionsstufe bewirkt beispielweise eine Wertsteigerung von einer Geldeinheit (GE).
- Sicherheitsbestände werden über zusätzliche Lageranfangsbestände in das System eingebracht. Die Produktionszeit und Produktionskosten für die Sicherheitsbestände werden entgegen der Realität ignoriert. Die Lagerkosten für Sicherheitsbestände werden über die Lagerkostensätze bestimmt, die auch für alle anderen Lagerbestandsarten gelten.

---

<sup>25</sup> Vgl. Minner (2000), S. 12f.

- Sicherheitsbestände sollen am Ende der Planungsperiode noch in vollem Umfang verfügbar sein und nicht verbraucht werden.
- Vorlaufzeiten sind produkt- und ressourcenabhängig konstant. Zur Vereinfachung werden Vorlaufzeiten nur als Produktionszeit interpretiert. Es treten somit keine Transportzeiten auf und die Frage, ob Sicherheitsbestände zwischen zwei Stufen am Produktionsort, am Ort der Weiterverarbeitung oder an beiden gehalten werden, stellt sich nicht.
- Losgrößen, von noch nicht in Auftrag gegebenen Losen, können ohne zusätzliche Kosten verändert werden. Neue Lose können nicht eingefügt werden. Bei der Erhöhung von Losen ist eine ressourcenabhängige Kapazitätsobergrenze zu beachten. Kapazität kann auf einer Produktionsressource zwischen Produkten ausgetauscht werden, indem für ein Produkt in einer Periode die Losgröße vermindert und für ein anderes erhöht wird.

### **3.3 Bestimmung ohne Flexibilisierung**

#### **3.3.1 Unabhängigkeit der Sicherheitsbestände**

Zusätzliche Voraussetzungen im Zusammenhang mit der Bestimmung von Sicherheitsbeständen ohne Flexibilisierung sind:

- Für alle Endprodukte liegt kein Sekundärbedarf vor. Ein Produkt wird demnach entweder als Vorprodukt oder als Endprodukt verwendet.
- Der Produktionsplan ist starr. Alle Lose werden in der Höhe produziert, die im Produktionsplan festgelegt ist.

Unter den gegebenen Voraussetzungen müssen nur Sicherheitsbestände für Produkte gehalten werden, für die Endnachfrage vorliegt. Die Nachfragen aller anderen Produkte sind durch den Produktionsplan fest vorgegeben.

Des weiteren folgt aus den Voraussetzungen, dass die Sicherheitsbestände voneinander unabhängig sind. Unabhängig bedeutet, sie beeinflussen sich nicht gegenseitig und können auch unabhängig voneinander bestimmt werden. Folgende Überlegung verdeutlicht dies:

Sicherheitsbestände sollen Lieferengpässe des jeweiligen Produkts vermeiden. Die kompensierende Wirkung von Sicherheitsbeständen auf Fehlmengen be-

einflusst weder die Losgröße des entsprechenden Produkts noch die anderer Produkte, da alle Losgrößen im Produktionsplan festgelegt sind. Sicherheitsbestände sind aus diesem Grund unabhängig, denn die unveränderlichen Losgrößen verhindern eine Rückwirkung auf Vorprodukte und die einzige Verbindung zu Sicherheitsbeständen von Produkten, die auf der gleichen Ressource gefertigt werden, besteht in der gemeinsamen Nutzung von Produktionskapazität, was aber gleichfalls durch den Produktionsplan unveränderlich fixiert ist. Produkte mit gleichzeitiger Sekundär- und Primärnachfrage sind durch die Annahmen ausgeschlossen, sodass Fehlmengen von Vorprodukten nicht auftreten können.

Bei der Bestimmung kann folglich auf die gemeinsame Betrachtung der Sicherheitsbestände verzichtet werden und für jeden einzeln ein optimaler Wert gesucht werden.

Wegen der Komplexität der stochastischen Zusammenhänge scheiden Analytisch-mathematische Methoden zur Bestimmung aus. Es bieten sich die Bestimmung mittels Simulation und Methoden der Linearen Programmierung (LP) an. Beide Möglichkeiten werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

### 3.3.2 Bestimmung mittels direkter Fehlmengenerfassung

In Anlehnung an eine Vorgehensweise, die in einem Working Paper<sup>26</sup> von de Kok als „Sample Path Lemma“ umrissen ist, soll hier ein Verfahren zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen beschrieben werden. De Kok geht von der Behandlung von Fehlmengen als Backorders aus und bestimmt Sicherheitsbestände zu einem vorgegebenen  $\alpha$ -Servicegrad. Hier sollen nun Verfahren für den  $\alpha$ - als auch für den  $\beta$ -Servicegrad angegeben werden, die von Fehlmengenbehandlung nach dem Lost-Sales-Prinzip ausgehen.

Zentrales Element bei dieser Bestimmung ist eine Simulation, die eine Supply Chain unter den im Kapitel 3.2 beschriebenen Prämissen abbildet. Die in Kapitel 4.2 vorgestellte Simulation entspricht diesen Vorgaben. Die Simulation verwendet keine Sicherheitsbestände und soll alle auftretenden Fehlmengen erfassen.

---

<sup>26</sup> Vgl. de Kok (2001), S. 14f.

Die Anzahl der verwendeten Simulationsläufe bzw. Umweltlagen beeinflusst die Qualität der Ergebnisse. Für statistisch bessere Ergebnisse sind möglichst viele Simulationsläufe auszuwerten. Unter einer Umweltlage wird eine Ausprägung der stochastischen Nachfragen für einen ganzen Planungszeitraum verstanden.

Um die Sicherheitsbestände für einen vorgegebenen  $\alpha$ -Servicegrad festzulegen, werden alle aufgetretenen Fehlmengen  $LS_{jts}$  für ein Produkt  $j$ , alle Perioden  $t = 1, \dots, T$  und alle Umweltlagen  $s = 1, \dots, S$  gesammelt. Ein Beispiel verdeutlicht die Vorgehensweise für zwei Umweltlagen mit jeweils zehn Perioden. Tabelle 1 zeigt die gesammelten Fehlmengen.

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$LS_{1t1}$	1	0	1,5	0,7	0	0	0	1,2	0	0
$LS_{1t2}$	0	0,5	1,1	0	0	2,1	0	3,1	0	1

**Tabelle 1:** Fehlmengen

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$LS_{1t1}^{kum}$	1	0	2,5	3,2	0	0	0	4,4	0	0
$LS_{1t2}^{kum}$	0	0,5	1,6	0	0	3,7	0	6,8	0	7,8

**Tabelle 2:** Kumulierte Fehlmengen

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$LS_{1t}^{kumsort}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	1	1,6	2,5	3,2	3,7	4,4	6,8	7,8

**Tabelle 3:** Fehlmengen - zusammengefasst, kumuliert und sortiert

Die Fehlmengen werden nun kumuliert (Tabelle 2)

$$LS_{jts}^{kum} = \begin{cases} \sum_{w=1}^t LS_{jws} & \forall t = 1, \dots, S \cdot T \mid LS_{jts} > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.1)$$

und in einer Reihe aufsteigend sortiert (Tabelle 3). Jeder Tabelleneintrag  $LS_{jt}^{kumsort} > 0$  in Tabelle 3 entspricht einer möglichen Sicherheitsbestandshöhe

$SS_j$ . Die Anzahl der Einträge in Tabelle 3 für die gilt  $0 < LS_{jt}^{kumsort} \leq SS_j$  ist die Anzahl der damit eliminierten Fehlmengensituationen.

Anhand des gewünschten  $\alpha$ -Servicegrads errechnet sich die maximale Anzahl von Perioden, die eine Fehlmenge aufweisen dürfen. Ist z.B. ein  $\alpha$ -Servicegrad von 90 % angestrebt, dürfen maximal 10 % der Perioden Fehlmengen aufweisen. In unserem Beispiel wären dies zwei Perioden. In Tabelle 3 kann nun der benötigte Sicherheitsbestand von 4,4 abgelesen werden, sodass höchstens zwei Perioden mit Fehlmengen verbleiben.

Für den  **$\beta$ -Servicegrad** muss anders vorgegangen werden.

Die aufgetretene Nachfrage für Produkt  $j$  in Periode  $t$  einer Umweltlage  $s$  wird mit  $D_{jts}$  bezeichnet.

$$LS_j^{\max} = (1 - \beta_j) \cdot \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T D_{jts} \quad (3.2)$$

$LS_j^{\max}$  ist die maximale gesamte Fehlmenge für den vorgegebenen Servicegrad  $\beta_j$  über alle Umweltlagen für Produkt  $j$ .

Im Gegensatz zur Bestimmung für den  $\alpha$ -Servicegrad sind nicht die einzelnen kumulierten Fehlmengensituationen relevant, sondern die Summe aller Fehlmengen über alle Perioden einer Umweltlage:

$$LS_{js} = \sum_{t=1}^T LS_{jts} \quad (3.3)$$

Alle solchen Umweltlagenfehlmengen  $LS_{js}$  werden nun monoton fallend sortiert, was über einen Subindex  $i$  des Index  $s$  ausgedrückt wird. Es gilt nun:

$$LS_{js_i} \geq LS_{js_{i+1}} \quad \forall i = 1, \dots, S-1 \quad (3.4)$$

Es ist nun das  $i^*$  zu suchen für das gilt:

$$\sum_{i=1}^{i^*-1} (LS_{js_i} - LS_{js_{i+1}}) \cdot i \leq LS_j^{\max} \leq \sum_{i=1}^{i^*} (LS_{js_i} - LS_{js_{i+1}}) \cdot i \quad (3.5)$$

Der gesuchte Sicherheitsbestand  $SS_j$  ergibt sich nun aus der Fehlmenge von  $s_{i^*}$  vermindert um den Anteil, um den die maximale Fehlmenge  $LS_j^{\max}$  unterschritten wurde.

$$LS_j^{\max} = \sum_{i=1}^{i^*} (LS_{js_i} - SS_j) \quad (3.6)$$

$$\Rightarrow SS_j = \frac{1}{i^*} \left( \left( \sum_{i=1}^{i^*} LS_{js_i} \right) - LS_j^{\max} \right) \quad (3.7)$$

Folgendes Beispiel veranschaulicht die Vorgehensweise. Es wird angenommen, dass die Summe aller Nachfragen  $\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T D_{jts} = 140$  ist. Der gewünschte Servicegrad ist  $\beta_j = 90\%$ , damit ergibt sich  $LS_j^{\max} = 126$ . In Tabelle 4 sind die sortierten Umweltlagenfehlmenngen mit den weiteren Berechnungen ersichtlich. Das  $i^*$  für das die oben genannte Bedingung gilt ist  $i^* = 5$ , bei  $LS_{j5}^{\max} \geq 100$ . Dies bedeutet, dass bei einem Sicherheitsbestand von  $LS_{j5} = 60$  ein  $\beta$ -Servicegrad höher als 90 % erreicht wird. Der Servicegrad von genau 90 % ergibt sich bei  $SS_j = \frac{1}{5}(400 - 126) = 54,8$

i	$LS_{js_i}$	$(LS_{js_i} - LS_{js_{i+1}}) \cdot i$	$\sum_{i=1}^{i^*-1} (LS_{js_i} - LS_{js_{i+1}}) \cdot i$
1	100	10	0
2	90	20	10
3	80	30	30
4	70	40	60
5	60	50	100
6	50	60	150
7	40	70	210
8	30	80	280

**Tabelle 4:** Berechnung von Sicherheitsbeständen für  $\beta$ -Servicegrad

Die beschriebenen Verfahren eignen sich nur für den Lost-Sales-Fall. Im Backorders-Fall werden mit der Eliminierung von Fehlmengen durch Sicherheitsbestände später auftretende Fehlmengen beeinflusst. Im Lost-Sales-Fall werden bei einer Erhöhung des Sicherheitsbestands jeweils die erste bzw. ersten Fehlmengen in einer Umweltlage vermindert oder eliminiert. Alle folgenden verbleibenden Fehlmengen bleiben unverändert.

Jede Fehlmenge mit Backorders muss in einer der Folgeperioden befriedigt werden. Wird eine Backorder-Fehlmenge nun mit einem Sicherheitsbestand

kompensiert, muss in den Folgeperioden kein zusätzlicher Bedarf erfüllt werden und es werden möglicherweise weitere Fehlmengen reduziert, was die Anwendbarkeit der oben beschriebenen Verfahren verhindert. Tabelle 5 zeigt ein Beispiel ohne Sicherheitsbestand mit Fehlmengen in Periode eins und drei. In Tabelle 6 wird die erste Fehlmenge durch einen Sicherheitsbestand von eins eliminiert, dadurch entfällt auch die zweite Fehlmenge.  $X_t$  ist die Produktionsmenge,  $D_t$  die Periodennachfrage,  $I_t$  der Lagerbestand am Ende einer Periode und  $BO_t^{best}$  ist der Fehlmengenbestand am Ende einer Periode.

t	$X_t$	$D_t$	$I_t$	$BO_t^{best}$
1	10	11	0	1
2	10	9	0	0
3	10	11	0	1

**Tabelle 5:** Beispiel – Backorders ohne Sicherheitsbestand

t	$X_t$	$D_t$	$I_t$	$BO_t^{best}$
1	10	11	0	0
2	10	9	1	0
3	10	11	0	0

**Tabelle 6:** Beispiel – Backorders mit Sicherheitsbestand = 1

### 3.3.3 Bestimmung mittels linearer Optimierung

Das von Stadtler entworfene und zur Verfügung gestellte lineare Optimierungsmodell<sup>27</sup> ist für die Bestimmung von Sicherheitsbeständen für starre Produktionspläne unter stochastischer Nachfrage bei festgelegten  $\beta$ -Servicegraden geeignet. Es wird die sogenannte stochastische Programmierung<sup>28</sup> verwendet. Die Stochastische Programmierung kann eingesetzt werden, wenn eigentlich ein lineares Optimierungsproblem vorliegt, einige Größen aber unter stochastischen Einflüssen stehen.

Im vorliegenden Fall werden die stochastischen Einflüsse durch Betrachtung möglichst vieler Umweltlagen mit verschiedenen Ausprägungen der stochastischen Periodennachfragen einbezogen und in einem deterministisches LP-

<sup>27</sup> Vgl. Stadtler (2002).

<sup>28</sup> Vgl. Beasley (2002).

Problem integriert. Trotz der deterministischen Vorgehensweise kann bei einer ausreichend großen Zahl von Umweltlagen, abgesehen von statistischen Abweichungen, von einer korrekten Lösung des stochastischen Problems gesprochen werden. Die Ausprägungen der Nachfrageverläufe können real gemessene Nachfragen sein oder müssen mit einem Zufallsgenerator erzeugt werden.

Das LP-Modell wird in Anhang B wiedergegeben. Interessant ist, dass der wichtigste Bestandteil der Zielfunktion aus den Sicherheitsbestandshöhen multipliziert mit dem jeweiligen Lagerkostensatz besteht. Die Lagerbestände der einzelnen Perioden gehen nicht in die Zielfunktion ein. Durch den starren Produktionsplan werden die Gesamtkosten minimal, wenn die Sicherheitsbestände bzw. deren Wert minimal sind bzw. ist.

Der zweite Term in der Zielfunktion soll verhindern, dass Sicherheitsbestände verbraucht werden und am Ende eines Planungszeitraums nicht mehr zur Verfügung stehen.

Eine der oben getroffenen Annahmen wird durch das Modell verletzt, alle Informationen über Nachfragen aller Planungszeiträume sind zwar stochastischer Natur, liegen aber vollständig vor und können so auch vor deren Eintreten schon verwendet werden. Dies scheint allerdings die Ergebnisse nicht zu beeinflussen, denn bei Ergebnisvergleichen mit dem Verfahren aus Kapitel 3.3.2 haben sich für gleiche Probleminstanzen die gleichen Ergebnisse eingestellt.

### **3.4 Bestimmung mit Flexibilisierung**

#### **3.4.1 Flexibilisierung durch Losgrößenanpassung**

Im letzten Abschnitt wurde die Bestimmung von Sicherheitsbeständen für einen starren Produktionsplan ohne nachträgliche Veränderungsmöglichkeiten des Plans betrachtet. Da Sicherheitsbestände nur passiv auf Nachfrageschwankungen wirken, verspricht eine aktive Reaktion und Anpassung an den Nachfrageverlauf durch Flexibilisierung der Produktion bessere Ergebnisse.

In Kapitel 2.2.3 wurde neben der Flexibilisierung durch rollierende Planung die Neueinplanung von Produktionsaufträgen genannt. In der Praxis und in der Literatur wird zur Reaktion auf unvorhergesehene Einflüsse in Form von Neueinplanung von Produktionsaufträgen häufig die Anpassung der Fertigstel-

lungstermine verwendet.<sup>29</sup> Die Anpassung der Auftragsgröße ist seltener zu finden, weil bei Vergrößerung der Lose die Bereitstellung der Vorprodukte schwierig sein kann und bei Verminderung nicht verwendete Vorprodukte übrig bleiben. Bei der Anpassung von Fertigstellungsterminen durch Vorziehen von Produktionsaufträgen müssen keine zusätzlichen Vorprodukte beschafft werden, sondern die später eingeplanten nur früher als geplant vorhanden sein. Dies ist anscheinend in der Praxis relativ leicht zu realisieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird trotzdem die Anpassung von Auftragsgrößen verwendet, weil dies im Vergleich zur Anpassung der Fertigstellungstermine wesentlich weniger Eingriffe in den bereits erstellten Produktionsplan erfordert und wahrscheinlich die Optimalität des Plans hinsichtlich der minimalen Rüst- und Lagerkosten weniger beeinträchtigt als das umfangreiche zeitliche Verschieben und Tauschen von Aufträgen.

Die grundlegende Logik bei der Auftragsgrößenanpassung ist, dass aktuellen oder prognostizierten Lieferengpässen mit einer Losgrößenerhöhung entgegengewirkt wird und hohe Lagerbestände als Folge von unerwartet niedriger Nachfrage durch Losgrößenverminderung gesenkt werden.

Die Erhöhung der Auftragsgröße ist nur möglich, wenn entweder ein Los eines anderen Produkts auf der gleichen Produktionsressource in der betreffenden Produktionsperiode reduziert wird oder ein ungenutzter Kapazitätspuffer (Schlupfkapazität) existiert, der schon bei der Produktionsplanerstellung eingeplant wurde.

Die Verkleinerung von Losen kann maximal in Höhe der Losgröße erfolgen, im Extremfall kann somit ein ganzes Los ausgelassen werden. Zur Vereinfachung werden in diesem Fall die Rüstkosten nicht reduziert. Es ist nicht sinnvoll Kosteneinsparungen durch nachträgliche Auslassung von Rüstvorgängen in Betracht zu ziehen, denn so würden alle umliegenden Lose und Rüstzeitpunkte eine Revision erfordern, was wiederum weitere Kettenreaktionen auslösen könnte und im Endeffekt die Optimalität des Produktionsplans in Frage stellen würde.

---

<sup>29</sup> Vgl. Ho / Carter / Melnyk / Narasimhan (1986), S. 122.

Es wurde schon erwähnt, dass die Bereitstellung der Vorprodukte bei einer Losgrößenerhöhung problematisch sein kann. Da die Produktion der Vorprodukte durch den Produktionsplan genau auf die bei der Weiterproduktion benötigten Mengen abgestimmt ist, müssen die zusätzlichen Vorprodukte ebenfalls aus einer Produktionserhöhung stammen.

Es gibt nun zwei Möglichkeiten diese Vorprodukte bei einer Produktion mit Vorlaufzeiten zur Verfügung zu stellen. Entweder muss eine Losgrößenerhöhung mit der maximalen indirekten Vorlaufzeit eingeplant werden und die direkt und indirekt benötigten Vorprodukte entlang der Supply Chain rechtzeitig bestellt werden oder man legt so früh wie möglich einen Puffer aller Vorprodukte an, aus dem der Bedarf gedeckt wird.

Die erste Möglichkeit scheidet aus, weil mindestens die indirekte Vorlaufzeit vergehen würde bis die Produktionsanpassung realisiert wäre. Dazu kommt noch, dass nicht immer zur richtigen Zeit ein (vergrößerbares) Los vorliegt und zusätzlich noch genügend Schlupfkapazität vorhanden ist. Dies führt zu einer weiteren Zeitverzögerung.

Es ist somit leicht einzusehen, dass für eine Produktionserhöhung die zur Verfügung zu stellenden direkten und indirekten Vorprodukte nicht erst noch bestellt, produziert und ausgeliefert werden können, bevor mit der Produktion des eigentlichen Produkts begonnen werden könnte. Man müsste so frühzeitig mit der Planung einer Produktionserhöhung beginnen, dass nicht mehr von einer kurzfristigen Anpassungsreaktion gesprochen werden könnte. Damit hätte man gleichfalls den Sinn der Flexibilisierung, möglichst schnell auf Nachfrageschwankungen zu reagieren, verfehlt.

Die einzige Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, ist das Anlegen von Puffern der Vorprodukte. Ob diese Puffer direkt am Produktionsort des Vorprodukts, am Ort der Weiterproduktion oder an beiden Orten zu halten sind, ist abhängig von Transport- oder anderen Vorlaufzeiten und der Produktionsstruktur. Bei konvergierenden Strukturen ist es beispielsweise sinnvoll solche Puffer immer am Ort der Produktion des nachfolgenden Produkts zu halten.

Da es ab dem Beginn des Planungszeitraums einige Zeit dauert bis ein solcher Puffer angelegt ist, empfiehlt sich ein Anfangspufferbestand, der wie ein Sicherheitsbestand am Anfang des Planungszeitraums zur Verfügung gestellt wird und damit die ersten Bedarfe an Vorprodukten für Losgrößenerhöhungen

deckt und dann bei genügend Schlupfkapazitäten wieder aufgefüllt werden kann, sodass am Ende des Planungszeitraums wieder der Pufferbestand in ursprünglicher Höhe zur Verfügung steht.

Auch wenn diese Puffer nicht direkt zur Kompensation von Unsicherheit verwendet werden, werden sie im weiteren als Sicherheitsbestände bezeichnet.

### **3.4.2 Konsequenzen für die Sicherheitsbestandsbestimmung**

Im Vergleich zur Sicherheitsbestandsbestimmung bei starren Produktionsplänen sind nun auch Sicherheitsbestände für alle Vorprodukte zu halten und Sicherheitsbestandshöhen sind nicht mehr voneinander unabhängig.

Die Abhängigkeit lässt sich anhand eines Beispiels leicht zeigen. Betrachtet werden zwei Produkte A und B, die auf der gleichen Produktionsressource gefertigt werden. Geht man weiter davon aus, dass die Sicherheitsbestände für beide Produkte verbraucht worden sind und nun in den nächsten Perioden Fehlmengen auftreten, falls die Sicherheitsbestände nicht durch eine Losgrößenerhöhung aufgefüllt werden. Zum Auffüllen der Sicherheitsbestände müssen sich die beiden Produkte allerdings die gleiche Produktionsressource teilen. Es wird von dem Fall ausgegangen, dass alle nachfolgenden Fehlmengen des einen Produkts durch eine alleinige Ausnutzung der Schlupfkapazitäten vermieden werden könnten, bei einer Aufteilung des Schlupfes aber nicht. Würde man nun einen der beiden Sicherheitsbestände von Anfang an so weit erhöhen, dass die Auffüllung nicht nötig wäre, käme es auch nicht zu dem Engpass bei der Schlupfvergabe und die Fehlmengen beider Produkte wären verhindert worden. Folglich sind die Sicherheitsbestandshöhen voneinander abhängig.

Neben der eben beschriebenen horizontalen Abhängigkeit besteht zusätzlich eine vertikale Abhängigkeit. Werden beispielsweise höhere Sicherheitsbestände an Vorprodukten gehalten, könnte damit ein niedrigerer Endproduktsicherheitsbestand ausreichen, denn der Endproduktsicherheitsbestand könnte bei Verbrauch wesentlich einfacher wieder aufgefüllt werden, wenn ausreichend hohe Sicherheitsbestände der Vorprodukte zur Verfügung stehen. Diese Beziehung von Sicherheitsbeständen gilt paarweise zwischen aufeinanderfolgenden Supply Chain-Stufen über die ganze Kette hinweg aber auch zwischen indirekten Vorgängern bzw. Nachfolgern in der Kette.

Will man nun optimale Werte für alle Sicherheitsbestände bestimmen, hat man es mit sehr komplexen, stochastisch beeinflussten Zusammenhängen zu tun, die wahrscheinlich kaum analytisch lösbar sind. Als Lösungsmöglichkeit für Probleme dieser Art bietet sich Simulation in Kombination mit einem Optimierer an. Die Implementierung eines solchen Simulationsmodells ist in Kapitel 4 beschrieben.

### 3.4.3 Substitution der Lagerbestandsarten

Neben Sicherheitsbeständen sind drei weitere Lagerbestandsarten zu nennen: Losgrößenbestände als kurzfristige Bestände zwischen zwei Rüstvorgängen, saisonale Bestände zum Ausgleich von saisonalen Nachfrageschwankungen und ablaufbedingte Bestände, die durch Wartezeiten an Betriebsmitteln entstehen.<sup>30</sup>

Da der Sicherheitsbestand erst angebrochen wird, wenn alle anderen Bestandsarten aufgebraucht sind, bezeichnet man ihn als Lagerbodensatz. Die anderen Lagerbestandsarten können folglich ebenfalls die Aufgabe von Sicherheitsbeständen übernehmen und als Puffer zum Ausgleich von Nachfrageschwankungen eingesetzt werden. Es kann von einer Substitution der Sicherheitsbestände durch andere Lagerbestandsarten gesprochen werden, denn wenn die anderen Lagerbestände in ausreichender Höhe vorhanden sind, werden möglicherweise Teile der Sicherheitsbestände nicht genutzt und können von Anfang an reduziert werden.

Die geschilderte Substitution der Sicherheitsbestände ist in gleicher Weise auch ohne Flexibilisierung möglich. Die Substitution wird hier aber erst im Rahmen der Sicherheitsbestandsbestimmung unter flexibilisierter Produktion angesprochen, um zu diskutieren, ob in Planungsperioden mit ausreichend hohen Los- und saisonalen Beständen auf Sicherheitsbestände verzichtet werden kann bzw. mit Losgrößenverkleinerung abgebaut und bei sinkenden Los- und saisonalen Beständen wieder aufgebaut werden sollten.

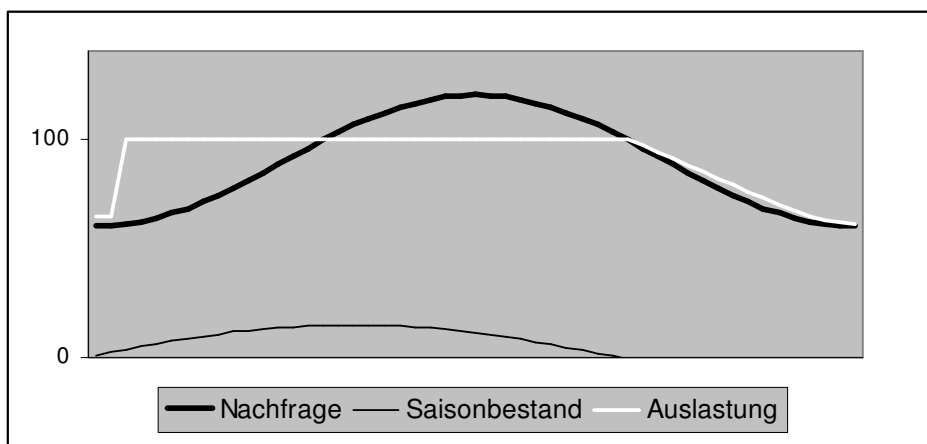
In Abbildung 4 ist schematisch die Beziehung zwischen Saisonbestand, Nachfrage und Kapazitätsauslastung dargestellt. Die Kapazitätsgrenze liegt bei 100 Einheiten. Für den Zeitabschnitt, in dem die Nachfrage pro Periode größer als

---

<sup>30</sup> Vgl. Stadler (2000a), Kapitel 2.4, S. 1-1.

die Kapazitätsgrenze ist, muss in den vorhergehenden Perioden eine Vorproduktion stattfinden, um den Kapazitätsengpass zu vermeiden. Die vorproduzierten Produkte werden als Saisonbestand eingelagert, bis die Höhe der Nachfrage die laufende Produktion übersteigt und dann wieder abgebaut.

Sollen nun während der Existenz des saisonalen Bestands die Sicherheitsbestände reduziert werden, müssten diese bei abnehmenden saisonalen Beständen wieder aufgefüllt werden. Aus Abbildung 4 wird jedoch klar, dass zu diesem Zeitpunkt keine Kapazitäten für eine Auffüllung bereitstehen. Dieser Sachverhalt ergibt sich zwingend aus dem grundlegenden Zweck von Saisonbeständen, der Überwindung von Kapazitätsengpässen. Saisonale Bestände könnten demnach Sicherheitsbestände ersetzen, jedoch ist nach deren Verbrauch eine ausreichende Sicherheitsbestandshöhe nicht mehr sichergestellt.



**Abbildung 4:** Saisonbestand, Nachfrage und Auslastung

Bei Losgrößenbeständen stellt sich eine ähnliches Problem. Erstens werden Losgrößenbestände nur kurzfristig angelegt, so dass ein absenken und wieder auffüllen von Sicherheitsbeständen aus zeitlichen Gründen kaum in Frage kommt. Zweitens widerspricht ein solches Vorgehen dem Zweck der Losgrößenbestände. Denn nach Einstellen der Produkte aus einem Los als Losgrößenbestand in ein Lager, existiert weder ein weiteres Los mit dem der Sicherheitsbestand abgesenkt werden könnte noch ein Los, das bei abnehmenden Losgrößenbeständen den Sicherheitsbestand wieder auffüllen könnte. Würde man ein weiteres Los mit einem zusätzlichen Rüstvorgang zwischen

zwei Losen einfügen, wäre der Sinn des Losgrößenbestands zur Verminderung von losfixen Kosten in Frage gestellt.

Ablaufbedingte Bestände entstehen vor Betriebsmitteln. Wenn es sich um reine Vorprodukte handelt, werden diese durch die folgenden Betriebsmittel in Produkte mit Primärnachfrage transformiert. Es besteht demnach keine Möglichkeit, diese direkt zum Ausgleich von Nachfrageschwankungen einzusetzen. Durch zeitliches Verschieben von Produktionsaufträgen könnten knappe Produkte so früher als geplant produziert werden. Auch bei Produkten, für die sowohl Primär- als auch Sekundärbedarf besteht, könnten ablaufbedingte Bestände zum Ausgleich von Nachfrageschwankungen verwendet werden. Die nähere Untersuchung von Substitution von Sicherheitsbeständen durch ablaufbedingte Bestände werden allerdings aus den weiteren Untersuchungen ausgeklammert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Losgrößen- und Saisonalbestände Sicherheitsbestände nicht vollständig ersetzen, sondern nur als zusätzliche Puffer gegen Nachfrageschwankungen unterstützen können, was auch eine Senkung des Ausgangssicherheitsbestands ermöglichen könnte. Eine Antwort auf diese Vermutung werden die empirischen Auswertungen in Kapitel 5 geben.

## 4 Simulationssystem zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen

In diesem Kapitel wird die Implementierung einer Software zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen in Supply Chains beschrieben, bestehend aus einer Simulation und einem Optimierer. Zuerst wird mit Abschnitt 4.1 ein Überblick gegeben und die groben Zusammenhänge zwischen Simulator und Optimierer dargestellt. In 4.2 und 4.3 werden zuerst jeweils theoretische Grundlagen dargestellt und dann die einzelnen Softwaremodule des Simulators und Optimierers beleuchtet. Abschließend wird in 4.4 die Korrektheit der Implementierung diskutiert.

### 4.1 Überblick

Wie in Kapitel 3.4.2 erläutert, ist die Bestimmung von Sicherheitsbeständen mit Flexibilisierung ein komplexes Problem. Es muss für jedes Produkt ein Sicherheitsbestand festgelegt werden, wobei die einzelnen Sicherheitsbestände voneinander abhängen. Die Kausalbeziehungen sind nicht einseitig, sodass die Sicherheitsbestände nicht nacheinander festgelegt werden können, sondern nur gleichzeitig.

Eine analytische Lösung zu finden, ist vermutlich schwierig, sodass hier als Lösungsmethode eine Simulation verwendet wird.

Eine Simulation allein kann allerdings keine kostenminimalen Sicherheitsbestände finden. Eine Simulation kann lediglich Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen transformieren. Eingangsgröße ist hier für alle Produkte jeweils eine Sicherheitsbestandshöhe. Ausgangsgröße sind die mit dieser Kombination von Eingangsgrößen erzielten Kosten. Um nun Sicherheitsbestände mit optimalen (minimalen) Kosten zu finden, wird als übergeordnete Einheit ein Optimierer benötigt. Dieser wählt bestimmte Kombinationen von Sicherheitsbeständen aus, lässt diese von der Simulation bewerten und wiederholt diese beiden Schritte solange, bis davon ausgegangen werden kann, dass kein besseres Ergebnis unter den gegebenen Rahmenbedingungen gefunden werden kann.

## 4.2 Bewertung von Sicherheitsbeständen durch Simulation

### 4.2.1 Begriffsbestimmung und Grundlagen

Simulation kann definiert werden als „the process of designing a mathematical or logical model of a real system and then conducting computer-based experiments with the model to describe, explain, and predict the behavior of the real system“.<sup>31</sup>

Vorraussetzung für Simulation ist demnach ein Modell, das Simulationsmodell. „Unter einem Modell versteht man die (vereinfachte) Nachbildung eines Originalsystems. Das Modell muss dem Originalsystem im Hinblick auf den Zweck seiner Realisierung hinreichend ähnlich sein.“<sup>32</sup>

Es stellt sich nun die Frage, warum Experimente nicht direkt an einem realen System durchgeführt werden. Gründe für das Verwenden von einem Modell anstelle des realen Systems können sein, dass das reale System (noch) nicht existiert oder dem Experimentator nicht zur Verfügung steht, Experimente zu teuer, zu gefährlich sind oder die zukünftige Entwicklung prognostiziert werden soll.<sup>33</sup>

Im Fall von Fertigungs- und Lagerhaltungsmodellen, sind Experimente am realen System sehr teuer. Oft hat der Experimentator keinen ausreichenden Zugang zum Originalsystem. Außerdem sollen meistens auch längerfristige Entwicklungen untersucht werden, die bei mehrfach hintereinander ausgeführten Experimenten sehr viel Zeit in Anspruch nehmen würden.

Eine Alternative zu Simulationsmodellen können analytische Modelle sein. Es handelt sich dabei um die Formulierung des Problems und dessen Zusammenhängen mit mathematischen Ausdrücken. Zur Beantwortung der Fragestellungen des Analysten werden analytische Methoden der Mathematik verwendet.<sup>34</sup>

Die Vorteile von analytischen Lösungsmethoden sind, dass sie vor allem im Vergleich zu stochastischen Simulationen präzisere Ergebnisse liefern. Beliebige

---

<sup>31</sup> Hoover / Perry (1990), S. 5.

<sup>32</sup> Sauerbier (1999), S. 18.

<sup>33</sup> Vgl. Sauerbier (1999), S. 5 und Hoover / Perry (1990), S. 10-12.

<sup>34</sup> Vgl. Hoover / Perry (1990), S. 139f.

viele gleichartige Systeme können bei Vorliegen eines analytischen Lösungsverfahrens relativ schnell untersucht werden. Problematisch ist es, komplexe Sachverhalte, wie sie oft in realen Systemen vorzufinden sind, in analytischen Modellen abzubilden und zu lösen. Komplizierte Strukturen, beispielsweise mit Nichtlinearitäten oder stochastischen Elementen, können mit Simulation wesentlich einfacher abgebildet werden.<sup>35</sup>

Oft ist eine kombinierte Verwendung von analytischen Modellen und Simulation sinnvoll. Analytische Modelle können bei der Konstruktion, Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen hilfreich sein. Dabei werden mit dem analytischen Modell häufig Sonderfälle aus der Problemstellung des Simulationsmodells abgebildet, die sich besonders leicht analytisch lösen lassen.<sup>36</sup>

Unter Verifikation versteht man die Überprüfung, ob ein Rechnermodell (Simulationsmodell) dem formalen Modell entspricht. Bestätigt werden soll auch, dass jeder Einzelschritt der Simulation eine korrekte Funktionalität besitzt.<sup>37</sup>

Auch wenn alle Einzelschritte korrekt sind, kann man nicht selbstverständlich davon ausgehen, dass das Ergebnis richtig ist. Aus diesem Grund wird nach einer Verifikation eine Validierung durchgeführt. Hierbei geht es um die Überprüfung der inhaltlichen Korrektheit des Rechnermodells und dessen hinreichender Übereinstimmung mit dem realen System.<sup>38</sup>

Ohne zufriedenstellende Verifikation und Validierung eines Simulationsmodells müssen die Ergebnisse einer Simulation in Frage gestellt werden. Verifikation und Validierung sind somit unverzichtbare Bestandteile einer Simulationsstudie.

#### **4.2.2 Aufbau des Simulationsmodells**

Als Grundlage für den Simulator wurde eine Implementierung von Wirawan verwendet. Seine Implementierung entstand im Rahmen einer Studienarbeit<sup>39</sup>

---

<sup>35</sup> Vgl. Sauerbier (1999), S. 5f.

<sup>36</sup> Vgl. Hoover / Perry (1990), S. 139.

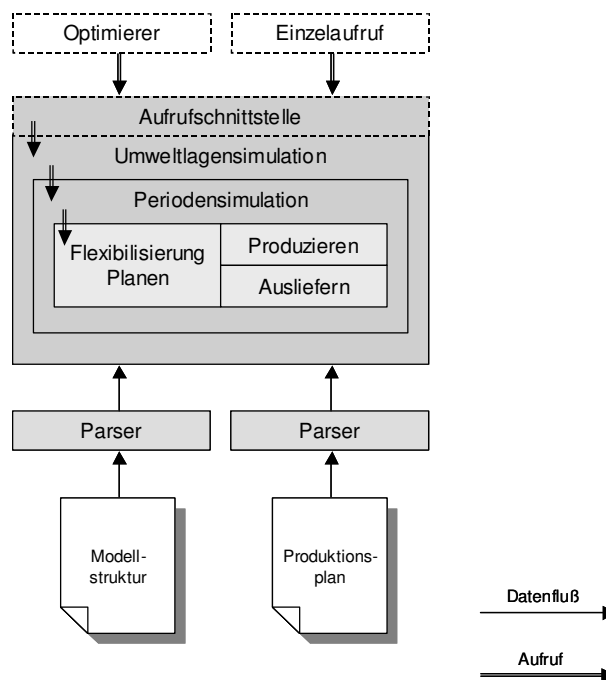
<sup>37</sup> Vgl. Sauerbier (1999), S. 103.

<sup>38</sup> Vgl. Sauerbier (1999), S. 103-105.

<sup>39</sup> Vgl. Wirawan (2002).

am gleichen Fachgebiet und Institut an der TU Darmstadt. Als Programmiersprache wurde Java eingesetzt.

Die Implementierung von Wirawan wurde teilweise überarbeitet und um ein Modul zur Flexibilisierung eines starren Produktionsplans erweitert. Die Beschreibung dieses neuen Moduls erfolgt in Kapitel 4.2.3.1. Des weiteren wird in Kapitel 4.2.3.2 noch die Implementierung der Fehlmengenbehandlung als Lost-Sales oder Backorders diskutiert. Als Dokumentation aller anderen Bestandteile des Systems kann die Studienarbeit von Wirawan herangezogen werden.



**Abbildung 5:** Schematische Architektur des Simulators

Um einen Überblick über die grobe Architektur des Simulators zu erhalten, ist Abbildung 5 hilfreich.

Ein zuvor erstellter Produktionsplan und die Supply Chain-Struktur müssen in Dateiform vorliegen. Letztere definiert alle Produkte, Ressourcen und Lieferverbindungen. Des weiteren werden u.a. Produktions- und Direktbedarfskoeffizienten, Primärnachfrageparameter und Lagerkostensätze festgelegt.

Die beiden Dateien werden jeweils von einem Parser eingelesen und dem Simulationskern zu Verfügung gestellt.

Die Simulation kann entweder mehrfach vom Optimierer (siehe Kapitel 4.3) im Rahmen einer Optimierungsreihe aufgerufen werden oder einmalig zum Zwecke von „manuellen“ Experimenten.

Ein Aufruf erfolgt immer über die Aufrufchnittstelle. Diese ruft die Umweltlagensimulation auf. Unter einer Umweltlage wird eine Ausprägung aller für einen Planungszeitraum benötigten stochastischen Nachfragevariablen verstanden.

Um statistisch aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten, werden möglichst viele Umweltlagen mit verschiedenen zufälligen Nachfragen simuliert. Dieser Vorgang wird über die Umweltlagensimulation gesteuert.

Die Simulation für eine Umweltlage wird über die Periodensimulation abgewickelt. Hier wird jede Periode des Planungszeitraums einzeln simuliert. In jeder Periode wird zuerst die Flexibilisierung geplant, die gegebenenfalls Losgrößen verändert. Danach erfolgt die Produktion und Auslieferung.

## 4.2.3 Erweiterungen des Simulationsmodells

### 4.2.3.1 Implementierung der Flexibilisierung

Wie in Kapitel 3.4.1 erläutert, soll die Flexibilisierung aktuelle oder prognostizierte Lieferengpässe durch Losgrößenerhöhung vermeiden helfen und hohe Lagerbestände als Folge von unerwartet niedriger Nachfrage durch Losgrößenverminderung senken.

Wenn die auftretenden Nachfragen immer dem Erwartungswert entsprechen, treten keine Fehlmengen auf und es ist keine Flexibilisierung nötig, deshalb soll Flexibilisierung über die kumulierten Nachfrageabweichungen gesteuert werden. Unter den kumulierten Nachfrageabweichungen  $D_{jt}^{kumabw}$  soll die Summe der Differenzen zwischen erwarteter und aufgetretener Periodennachfrage bis zur letzten Periode vor der aktuellen Periode  $t$  verstanden werden:

$$D_{jt}^{kumabw} = \sum_{w=1}^{t-1} (E(D_{jw}) - D_{jw} + \Delta X_{jw}) \quad (4.1)$$

$\Delta X_{jw}$  sind die Abweichungen von der geplanten Losgröße durch umgesetzte Flexibilisierung, die als Korrekturterm in obige Formel einbezogen werden müssen.

Sind diese kumulierten Nachfrageabweichungen negativ, soll die aktuelle Losgröße um diesen Betrag erhöht werden, sind sie positiv, soll die Losgröße in dieser Höhe verkleinert werden. Eine solche Vorgehensweise kann auch als Auffüllen und Vermindern des Sicherheitsbestands interpretiert werden. Ein Sicherheitsbestand wird beansprucht, wenn die Nachfrage größer als erwartet ist. In diesem Fall soll eine Losgrößenerhöhung den Sicherheitsbestand wieder auf seine ursprüngliche Höhe bringen. Ist die Nachfrage kleiner als erwartet, wird zwar nicht direkt der Sicherheitsbestand erhöht, aber es entsteht ein „Überschussbestand“, der unnötige Lagerkosten verursacht und mit einer Losgrößenverkleinerung abgebaut werden soll.

Da nicht nur Sicherheitsbestände zur Kompensation unerwarteter Nachfrageschwankungen verwendet werden, sondern auch saisonale und Losgrößenbestände (siehe Kapitel 3.4.3), können durch eine Losgrößenerhöhung nicht nur Sicherheitsbestände wieder aufgefüllt, sondern auch verbrauchte saisonale Bestände. Ist  $D_{jt}^{kumabw} = 0$ , dann bedeutet dies, dass der Sicherheitsbestand und der saisonale Bestand in voller geplanter Höhe zur Verfügung stehen. Losgrößenbestände können nicht wieder aufgefüllt werden, da ein Losgrößenbestand nur bis zum nächsten Los reicht und ein Los benötigt wird zur Losgrößenerhöhung.

In Kapitel 3.4.1 wurde deutlich, dass Vorprodukte für eine Losgrößenerhöhung wiederum durch eine Losgrößenerhöhung dieser Produkte zur Verfügung gestellt werden müssen. Es wurde auch gezeigt, dass es sinnvoll ist, einen Puffer anzulegen und zusätzlich schon einen Anfangsbestand für diesen Puffer vorzugeben, der allerdings am Ende der Planungsperiode wie andere Sicherheitsbestände in voller Höhe bestehen muss.

Aus diesen Gründen werden zwei Sicherheitsbestandshöhen für jedes der Vorprodukte definiert, einerseits ein Sicherheitsbestand, der am Anfang der Planungsperiode sofort zur Verfügung steht und andererseits ein darüber liegender Wert, bis zum dem versucht wird, den Sicherheitsbestand aufzufüllen. Letzterer wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als zweites Sicherheitsbestandsniveau bezeichnet.

Betrachtet man die gesamte Planungsperiode dürfen Sicherheitsbestände nicht verbraucht werden. Bei einem starren Produktionsplan und Nachfrageschwankungen mit Mittelwert null wird der Sicherheitsbestand für Produkte

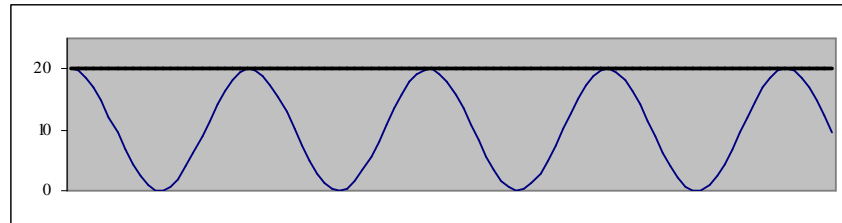
mit Primärnachfrage nicht verbraucht. Sobald aber Flexibilisierung verwendet wird, besteht die Gefahr, dass die Gesamtproduktion um die Höhe des Sicherheitsbestandes verkleinert und der Sicherheitsbestand damit verbraucht wird. Um dem vorzubeugen, soll eine Verminderung einer Losgröße nur erfolgen, wenn in den vorhergehenden Perioden in gleicher Höhe Lose vergrößert wurden. Wird diese Regel eingehalten, muss der Sicherheitsbestand am Ende des Planungszeitraums noch vorhanden sein.

Wenn allerdings in den ersten Perioden keine Losvergrößerung stattfindet, kann mit der angegebenen Regel keine Verminderung durchgeführt werden. Abhilfe schafft die oben genannte Bestimmung einer zweiten Sicherheitsbestandshöhe auch für Endprodukte, bis zu der der Sicherheitsbestand aufgefüllt werden soll. Stellt sich nun die Frage, warum man einen Sicherheitsbestand zuerst anhebt, um ihn danach wieder abzusenken. Durch Verwenden des zweiten, höheren Sicherheitsbestands kann der erste eigentliche Sicherheitsbestand niedriger festgelegt werden. Den Lagerkosten für Sicherheitsbestände, die durch Vermindern des ersten Sicherheitsbestandes gespart werden, stehen zwar höheren Lagerkosten für die Differenz zwischen dem ersten und dem zweiten Sicherheitsbestand entgegen, aber weil nun wesentlich flexibler auf Nachfrageschwankungen reagiert werden kann, sind die gesamten Lagerkosten für Sicherheitsbestände niedriger.

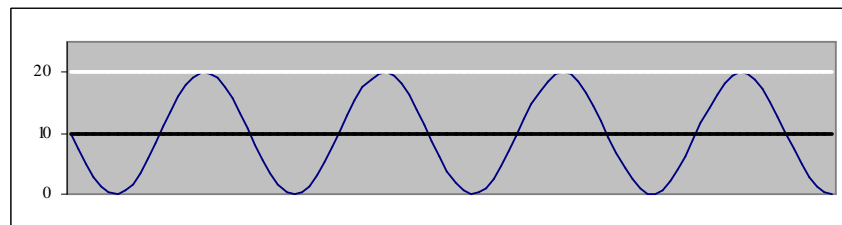
Es werden sowohl für End- als auch für Vorprodukte zweite Sicherheitsbestandsniveaus verwendet. In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind schematisch die Sicherheitsbestandsverläufe ohne und mit zweitem Sicherheitsbestandsniveau dargestellt. Die schwarze horizontale Gerade entspricht dem vorgegebenen Sicherheitsbestand, der auch am Ende des Planungszeitraums noch verfügbar sein muss. Die weiße Linie ist die zusätzliche Auffüllhöhe.

Die abwärtsgerichteten Kurvenverläufe resultieren aus größeren Nachfragen als erwartet oder bei Vorprodukten aus Losgrößenerhöhung der nachfolgenden Produkte. In Abbildung 6 wird durch Auffüllung versucht, wieder auf das Ursprungsniveau zu kommen. Bestände größer als der ursprüngliche Sicherheitsbestand können nicht auftreten, weil diese sofort abgesenkt werden. Betrachtet man nun den Mittelwert des Kurvenverlaufs aus Abbildung 6 sieht man, dass dieser weit unter der am Ende des Planungszeitraums benötigten Höhe liegt. Da die Flexibilisierung bei der vorliegenden Implementierung auf

zeitlich lokalen Entscheidungen beruht, muss man davon ausgehen, dass das Ende des Planungszeitraums „unerwartet“ auftritt und damit der mittlere Sicherheitsbestand der Kurve verfügbar ist. Der Sicherheitsbestand aus Abbildung 6 wurde demnach zur Hälfte verbraucht.



**Abbildung 6:** Sicherheitsbestandsverlauf ohne zusätzliche Auffüllhöhe



**Abbildung 7:** Sicherheitsbestandsverlauf mit zusätzlicher Auffüllhöhe

Abbildung 7 zeigt einen Sicherheitsbestandsverlauf mit gleicher Amplitude. Der vorgegebene Sicherheitsbestand von 10 wird hier aber nur für die Überbrückung der ersten Perioden ohne Auffülmöglichkeiten verwendet. Die Obergrenze des Sicherheitsbestands wird durch die zusätzliche Auffüllhöhe determiniert. Der Sicherheitsbestand oszilliert um 10 und ist damit am Ende des Planungszeitraums im Mittel noch in ausreichender Höhe vorhanden und nicht verbraucht.

Um mit dem genetischen Algorithmus ein zweites Sicherheitsbestandsniveau für jedes Produkt festzulegen, bieten sich zwei Möglichkeiten an. Entweder der zweite Sicherheitsbestand wird relativ zum ersten festgelegt oder er wird absolut bestimmt. Den zweiten Sicherheitsbestand absolut und damit unabhängig vom ersten zu bestimmen ist nicht sinnvoll, da somit auch Werte unterhalb des ersten Sicherheitsbestands möglich wären.

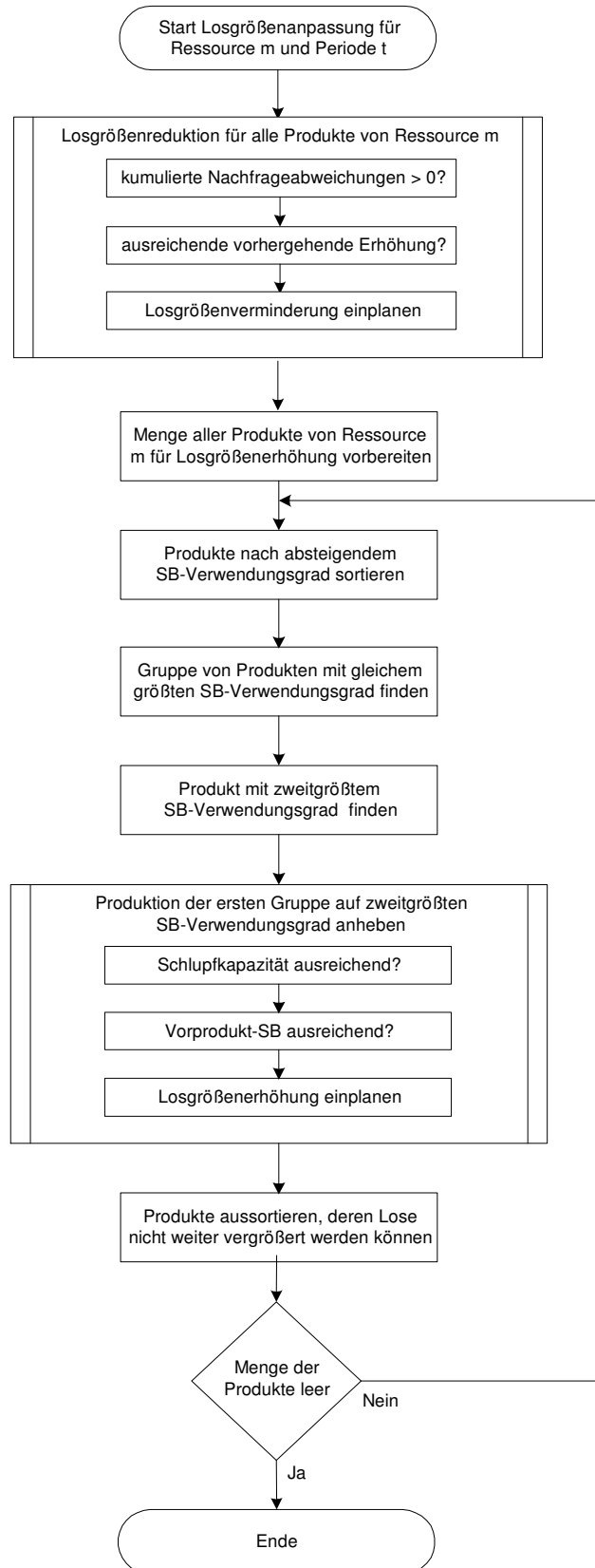
Die relative Bestimmung eines zweiten Sicherheitsbestands wurde getestet und festgestellt, dass der genetische Algorithmus Schwierigkeiten, hat gute Ergeb-

nisse zu finden. Dies hat möglicherweise mit der Verdoppelung der zu optimierenden Parameter oder der komplexen Abhängigkeitsstrukturen zu tun. Vielleicht wären auch wesentlich mehr Generationen und auch eine größere Populationsgröße nötig, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten. Dieses würde die Rechenzeit der Optimierung vervielfachen und den Zeitrahmen für die vorliegende Arbeit sprengen. Aus diesen Gründen wurden für die zweiten Sicherheitsbestände nach einigen Tests Konstanten festgelegt, die relativ gute Ergebnisse liefern. Der Gesamtsicherheitsbestand, bestehend aus dem ersten und zweiten Sicherheitsbestand, liegt demnach für alle Endprodukte bei 160 % und für alle Vorprodukte bei 150 % des ersten Sicherheitsbestands.

Um bei Vorprodukten das Verbrauchen der Sicherheitsbestände zu verhindern, wird vor einer Verwendung des Vorprodukts zur Losgrößenerhöhung eines Nachfolgeprodukts überprüft, ob die Summe der freien Schlupfkapazitäten zu Loszeitpunkten in den nächsten Perioden bis zum Ende des Planungszeitraums ausreichen, um den Sicherheitsbestand wieder aufzufüllen.

Dies ist nur eine Heuristik, die nicht garantieren kann, dass wirklich eine Auffüllung durchgeführt werden kann, denn die Produkte konkurrieren um die Schlupfkapazität und außerdem müssen zum Auffüllen auch alle benötigten Vorprodukte zur richtigen Zeit in ausreichender Höhe vorliegen. Man könnte auch jede Verwendung von Sicherheitsbeständen mit einer konkreten späteren Einplanung einer Auffüllung verbinden, um am Ende die ursprüngliche Sicherheitsbestandshöhe zu garantieren. Aber um für diesen Fall auch Vorproduktbedarfe zu koordinieren, müssten komplexe Probleme gelöst werden. Weiterhin bräuchte man einen Mechanismus zum Verschieben solcher zusätzlich eingeplanten Erhöhungen, falls die zeitliche Kapazitätsverteilung anders sinnvoller ist.

Die genannte Heuristik bewirkt erfahrungsgemäss, dass im Mittel die Vorproduktsicherheitsbestände nicht verbraucht werden (siehe Kapitel 5.2.2) und erfüllt damit seinen Zweck.



**Abbildung 8:** Ablauf der Losgrößenanpassung für eine Ressource

Der Ablauf der Losgrößenanpassung wird in Abbildung 8 veranschaulicht. Jede Ressource wird einzeln behandelt. Zuerst wird versucht, übermäßige (Sicherheits-)Bestände aller Produkte zu reduzieren, damit deren freigegebene Produktionskapazitäten und verwendete Vorprodukte für andere knappere Produkte und deren Losgrößenerhöhung verwendet werden können. Alle bis zum zweiten Sicherheitsbestandslevel zusätzlich produzierten Bestände werden vorerst wieder auf das erste Sicherheitsbestandslevel reduziert. Danach folgt die gleichmäßige Erhöhung aller Sicherheitsbestände auf das zweite Sicherheitsbestandslevel.

Um die eben genannte Gleichmäßigkeit umzusetzen, wird eine Prioritätsregel angewendet. Für diese Regel ist eine Kennzahl nötig, die aussagt, um wieviel bei einem Produkt der Sicherheitsbestand bzw. der Saisonbestand aufgebraucht ist. Es ist das Verhältnis der kumulierten Nachfrageabweichungen zum anfänglichen Sicherheitsbestand (1. SB-Niveau). Diese Kennzahl wird Sicherheitsbestand-Verwendungsgrad (SB-Verwendungsgrad) genannt.

$$SB - \text{Verwendungsgrad}_{jt} = \frac{D_{jt}^{kumabw}}{SS_j^1} \quad (4.2)$$

Um nun knappe Ressourcen (Produktionskapazitäten und Vorprodukte) gleichmäßig auf alle Produkte zu verteilen, werden Stück für Stück die Losgrößen aller Produkte erhöht, um sie auf den gleichen SB-Verwendungsgrad zu bringen.

Dazu werden die Produkte mit dem größten SB-Verwendungsgrad gesucht und deren Lose soweit vergrößert, dass der SB-Verwendungsgrad dem vorher zweitgrößten SB-Verwendungsgrad entspricht. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis entweder alle Produkte einen SB-Verwendungsgrad von null besitzen oder die Lose aufgrund von mangelnder Schlupfkapazität oder mangelnden Vorprodukten nicht weiter vergrößert werden können.

Bei der Losgrößenerhöhung einer Gruppe von Produkten mit dem gleichen SB-Verwendungsgrad werden diejenigen bevorzugt, deren kumulierte Losgrößenänderungen im Verhältnis zur Sicherheitsbestandshöhe möglichst klein ist. Folgende Formel bestimmt diese Prioritätskennzahl.

$$\text{Prio}_{jt} = \frac{1}{SS_j} \sum_{w=1}^t \Delta X_{jw} \quad (4.3)$$

Man könnte vermuten, dass andere Prioritätsregeln z.B. basierend auf den aktuellen  $\beta$ -Servicegraden oder den zukünftigen Auffülmöglichkeiten besser abschneiden, es hat sich aber herausgestellt, dass diese Regel besonders gute Ergebnisse liefert, weil somit diejenigen Produkte zuerst aufgefüllt werden (und zuerst Zugriff auf die vielleicht knappen Vorprodukte bekommen), deren über den Anfangssicherheitsbestand hinausgehender Bestand bisher am geringsten erhöht wurde.

Soll ein Los eines Produkts vergrößert werden, muss zuerst überprüft werden, ob genug Schlupfkapazität frei ist, wenn nicht, wird der Erhöhungsbetrag korrigiert. Danach werden die Vorproduktverfügbarkeiten getestet und bei Mangel ebenfalls der Erhöhungsbetrag korrigiert. Ist der endgültige Erhöhungsbetrag noch größer als null, wird er eingeplant.

Die Reihenfolge der Ressourcen bei der Losgrößenänderung wird so festgelegt, dass zuerst die Endprodukte behandelt werden und dann die Supply Chain Stufe für Stufe in Richtung erste Vorprodukte zurückgegangen wird, damit verwendete Vorprodukte wieder aufgefüllt werden können.

Damit bei einer Produktion ohne Vorlaufzeiten genügend Vorprodukte zur Verfügung stehen, wird für alle Ressourcen, die Vorprodukte fertigen, eine Erhöhung ohne vorherige Verminderung in umgekehrter Reihenfolge (von den ersten Vorprodukten bis zu den Endprodukten) durchgeführt. Mit Vorlaufzeiten ist dies nicht sinnvoll bzw. hat keine Auswirkung, denn die Produkte aus vergrößerten Vorproduktlosen können nicht in der gleichen Periode weiterverarbeitet werden.

Um die kumulierten Nachfrageabweichungen korrekt bestimmen zu können, wird in der Simulation ein Vektor für jedes Produkt  $j$  angelegt, der für jede abgeschlossene Periode die Differenz zwischen erwarteter und aufgetretener Nachfrage  $E(D_{jt}) - D_{jt}$  enthält. Bei einer Korrektur der kumulierten Nachfrageabweichungen durch Losgrößenvariation werden die korrigierten Werte  $\Delta X_{jw}$  auch wieder zu dem Vektorelement für die entsprechende Periode addiert.

Die entsprechende Periode muss nicht die aktuelle Periode sein. Wenn Vorlaufzeiten  $> 0$  verwendet werden, muss die Vorlaufzeit als Verzögerung eingerechnet werden. Maßgeblich ist die Periode, in der die Produkte im Lager zur

Weiterproduktion zur Verfügung stehen. Wie in Kapitel 3.2 vorausgesetzt, werden Vorlaufzeiten zur Vereinfachung nur als Produktionszeiten interpretiert, sodass bei einer Losauflage in der aktuellen Periode der Lagereingang aus der Produktion genau um die Vorlaufzeit verzögert auftritt.

Damit die kumulierten Nachfrageabweichungen für anstehende Losgrößenanpassungen dieses Produkts richtig bestimmt werden, muss immer über alle bisherigen Perioden und zusätzlich noch über zukünftige Perioden im Umfang der Größe der Vorlaufzeit kumuliert werden. Ist allerdings für eine Losgrößenerhöhung der Sicherheitsbestand eines Vorprodukts zu bestimmen, darf nur bis zur aktuellen Periode kumuliert werden, denn Losgrößenerhöhungen, deren Ergebnis aufgrund einer Vorlaufzeit erst in der Zukunft verfügbar sind, können für die aktuelle Periode noch nicht als Vorprodukte verwendet werden.

#### 4.2.3.2 Fehlmengenbehandlung als Lost-Sales und Backorders

Bei einer Fehlmengenbehandlung als Lost-Sales bei einem Servicegrad von  $\beta$  ist  $1-\beta$  % der Nachfrage „verloren“. Wenn ein Produktionsplan für eine Nachfrage von 100 % erstellt wurde, werden  $1-\beta$  % der produzierten Menge nicht nachgefragt und bleiben am Ende der Planungsperiode übrig. Dies wäre nicht weiter problematisch, wenn diese  $1-\beta$  % der Nachfrage nicht Sicherheitsbestände ersetzen würden. Wenn ab dem ersten Auftreten der Lost-Sales höhere Lagerbestände als geplant auftreten, können diese wie Sicherheitsbestände zur Fehlmengenkompensation genutzt werden. Für die Sicherheitsbestandsbestimmung bedeutet dies, dass Sicherheitsbestandshöhen und Sicherheitsbestandslagerkosten eigentlich zu niedrig angesetzt werden.<sup>40</sup>

Eine Lösung ist, die Nachfrage folgendermaßen zu korrigieren:

$$\bar{p}_j^{plan} = \bar{p}_j^{best} \cdot \beta_j \quad (4.4)$$

Die bei der Produktionsplanerstellung verwendete mittlere geplante Nachfrage  $\bar{p}_j^{plan}$  wird somit ausgehend von der auf den Bestellungen basierenden mittleren Nachfrage  $\bar{p}_j^{best}$  und dem  $\beta$ -Servicegrad reduziert. Man geht somit davon aus, dass eine Managemententscheidung vorliegt, die besagt, dass nur  $\beta$  % der

---

<sup>40</sup> Vgl. Minner (2000), S. 46-48.

Nachfrage befriedigt werden soll und demnach auch nur genau diese Menge produziert wird.

Falls, entgegen der Realität, in einer Simulation die mittlere Nachfrage (entsprechend der Bestellungen) vorgegeben werden kann, ist es möglich, diese bei einem fest vorgegebenen Produktionsplan zu korrigieren:

$$\bar{p}_j^{best} = \frac{\bar{p}_j^{plan}}{\beta_j} \quad (4.5)$$

Dies ist besonders sinnvoll, wenn ausgehend von einem gleichen Produktionsplan die Sicherheitsbestandsbestimmung mit Lost-Sales und Backorders verglichen werden soll. Bei Backorders tritt das Problem nicht auf, denn alle Fehlmengen müssen in den Folgeperioden erfüllt werden.

In der vorliegenden Simulation wurde eine solche Korrektur verwendet.

Für Backorders ergibt sich ein anderes Problem. Wenn Fehlmengen auftreten und ein  $\beta$ -Servicegrad verwendet wird, darf jede Fehlmenge nur einmal gezählt werden. Der Fehlmengenbestand (Backorders) aus vorherigen Perioden geht, im Gegensatz zum  $\gamma$ -Servicegrad (siehe Kapitel 2.2.2), nicht als Fehlmenge in den  $\beta$ -Servicegrad ein. Werden nun, wie in der Praxis üblich, Backorders mit der höchsten Priorität bedient, kann es sein, dass die reguläre Nachfrage nicht mehr in der vorgesehenen Periode befriedigt werden kann und eine neue Fehlmenge auftritt, die aber nur aus der bevorzugten Behandlung der Backorders resultiert. Somit könnte eine Fehlmenge mehrere Folge-Fehlmengen verursachen, die sich im  $\beta$ -Servicegrad widerspiegeln.

Eine Lösung ist, die für den  $\beta$ -Servicegrad gemessenen Fehlmengen zu korrigieren:

$$BO_t^\beta = \text{Max}(BO_t - L_t^{BO}, 0) \quad (4.6)$$

$BO_t$  sind die in einer Periode aufgetretenen Fehlmengen,  $BO_t^\beta$  sind die Fehlmengen, die für den  $\beta$ -Servicegrad gezählt werden sollen und  $L_t^{BO}$  sind die Lieferungen zur Befriedigung von Backorders.

Für die Implementierung wird aus Gründen der einfacheren Umsetzung die Priorität der Backorders geringer als die normale Periodennachfrage gesetzt. Somit können bei der regulären Periodennachfrage keine Fehlmengen aufgrund von bedienten Backorders auftreten. Die mit geringerer Priorität danach

zu befriedigenden Backorders werden in der Implementierung gesondert behandelt und bei Auftreten von Fehlmengen nicht als Fehlmenge gewertet.

## 4.3 Optimierung mittels genetischer Algorithmen

### 4.3.1 Theoretische Grundlagen

Es gibt für die meisten Probleme verschiedene Lösungsmöglichkeiten. Üblicherweise wird angestrebt, dasjenige Verfahren zu finden, das effizient eine zulässige und zugleich beste Lösung finden kann.

Liegen einem Problem funktionale Zusammenhänge zugrunde, kann von der Optimierung einer Zielfunktion gesprochen werden. Oft sind über eine Zielfunktion wenig oder keine analytischen Informationen vorhanden. Wenn eine Simulation zur Repräsentation der Zielfunktion verwendet wird, trifft dies vorwiegend auch zu. Bei derartigen Rahmenbedingungen bietet sich die Verwendung von direkten Suchverfahren an. Es wird versucht, durch iterative Variation bekannter Lösungen bessere (möglicherweise optimale) Lösungen zu finden. Direkten Suchverfahren liegt folgendes Schema zugrunde:<sup>41</sup>

```

g := 0;
initialisiere P(g);
bewerte P(g);
do while not Abbruch-Bedingung
  P'(g) := variere P(g);
  bewerte P'(g);
  P(g + 1) := berechne aus P'(g);
  g := g + 1;
done

```

$P(g)$  ist eine Menge bereits bewerteter Lösungen, die die Basis für die nächste Iteration darstellen. Über  $P'(g)$  wird sich mit Tastschritten von  $P(g)$  entfernt. Nach Abbruch enthält  $P(g)$  die beste Lösung, falls diese verfahrensabhängig immer in  $P(g)$  verbleibt, ansonsten, muss die beste Lösung zusätzlich abgelegt werden.

Konkrete direkte Suchverfahren unterscheiden sich meist in der Implementierung von *variere* und *berechne*.

---

<sup>41</sup> Vgl. Hammel / Bäck (1998), S. 1f.

Evolutionäre Algorithmen sind spezielle Formen von direkten Suchverfahren, mit denen versucht wird, die biologische Evolution nachzuahmen, um für besonders komplexe Probleme effizient Lösungen zu finden.

Wenn man die Anzahl möglicher Zustände einer DNA<sup>42</sup> höherer Organismen von etwa  $10^{19.500.000}$  mit der Zeit von  $3 \cdot 10^{17}$  Sekunden vergleicht, die seit dem Urknall verstrichen sind, so wird deutlich, dass die Evolution auf einem äußerst effizienten Prozess basieren muss. Sie hat innerhalb von relativ kurzer Zeit eine vergleichsweise große Anzahl von Parametern sehr erfolgreich optimiert.<sup>43</sup>

Evolutionären Algorithmen liegt folgendes Schema zugrunde, das eine leichte Variation des oben beschriebenen allgemeinen Schemas für direkte Suchverfahren ist:<sup>44</sup>

```

g := 0;
initialisiere P(g);
bewerte P(g);
do while not Abbruch-Bedingung
  P'(g) := rekombiniere P(g);
  P''(g) := mutiere P'(g);
  bewerte P''(g);
  P(g + 1) := selektiere aus P''(g) ∪ R(g);
  g := g + 1;
done

```

Evolutionäre Algorithmen arbeiten meistens mit einer größeren Kardinalität von  $P(g)$  als andere direkte Suchverfahren, so dass bei  $P(g)$  von einer Population aus Individuen gesprochen werden kann.

*Rekombiniere* soll die Merkmale zweier oder mehrerer elterlicher Individuen kombinieren. *Mutiere* ist eine zufällige Veränderung einzelner Merkmale eines Individuums. Bei *selektiere* wird eine neue Generation nach bestimmten Kriterien aus der variierten Elterngeneration  $P''(g)$  und einer Menge von Individuen mit überdurchschnittlicher Fitness  $R(g)$  gebildet. Fitness wird die quantifizierte Stärke eines Individuums genannt, die bei *bewerte* festgelegt wird.

---

<sup>42</sup> Desoxynucleoic acid – Träger der Erbinformation.

<sup>43</sup> Vgl. Hammel / Bäck (1998), S. 4.

<sup>44</sup> Vgl. Michalewicz (1994), S. 2f.

### 4.3.2 Genetischer Algorithmus des Ausgangssystems

Die im letzten Kapitel eingeführten evolutionären Algorithmen sind eine Obermenge einer Reihe von Optimierungsverfahren, die die biologische Evolution als Vorbild verwenden. Sogenannte genetische Algorithmen sind eines dieser Verfahren. Sie wurden in den 60er Jahren von J. H. Holland entwickelt.<sup>45</sup> Ein genetischer Algorithmus soll nun als Optimierungsverfahren bei der Bestimmung von Sicherheitsbeständen benutzt werden. Die zu optimierende Zielfunktion wird durch die in Kapitel 4.2 beschriebene Simulation definiert.

Wichtig ist, wie die im letzten Kapitel eingeführten Begriffe Individuum und Fitness auf den Anwendungsfall übertragen werden können.

Ein Individuum wird durch einen Vektor von Sicherheitsbestandshöhen repräsentiert. Die Fitness eines Individuums sind die aus der Simulation gewonnenen Gesamtlagerkosten, die dieser Ausprägung von Sicherheitsbestandshöhen zugeordnet werden.

Als Grundlage für den Optimierer lag eine Implementierung von Kempkes vor. Seine Implementierung entstand im Rahmen einer Studienarbeit<sup>46</sup> am gleichen Fachgebiet und Institut an der TU Darmstadt.

Die Implementierung von Kempkes wurde teilweise überarbeitet und um neue Funktionalität erweitert. In Kapitel 4.3.3.1 wird die Ergänzung um eine Servicegrad-Strafkostenfunktion beschrieben. Ein neues Verfahren zur Beschleunigung der Simulation in Kombination mit dem Optimierer wird in Kapitel 4.3.3.2 erläutert. Die Implementierung eines Feinsuchemoduls und neuer Operatoren für den genetischen Algorithmus werden in den Kapiteln 4.3.3.3 und 4.3.3.4 dargestellt. Als Dokumentation aller sonstigen Bestandteile des Optimierers und deren Funktionsweise kann die Studienarbeit von Kempkes herangezogen werden.

---

<sup>45</sup> Vgl. Goldberg (1989), S. 2.

<sup>46</sup> Vgl. Kempkes (2002).

### 4.3.3 Erweiterungen des Optimierers

#### 4.3.3.1 *Servicegrad-Nebenbedingung durch Strafkostenfunktion*

Im Ausgangssystem von Kempes und Wirawan wurden Sicherheitsbestände über die konkurrierenden Größen Lagerkosten und Fehlmengenkosten bestimmt. Die Bestimmung dieser Kosten basiert auf den produktabhängigen Lagerkosten- und Fehlmengenkostensätzen. Für die Lagerkostensätze lassen sich über die Kapitalbindungskosten leicht sinnvolle Werte festlegen. Die Fehlmengenkosten sind demgegenüber in der Praxis nur schwer zu quantifizieren. Tempelmeier und auch Axsäter empfehlen daher die Verwendung eines Servicegrades anstelle der Fehlmengenkosten.<sup>47</sup>

Für die Simulation bedeutet dies, dass in der Zielfunktion nur noch die Lagerkosten enthalten sind und die Fehlmengen über einen Mindest-Servicegrad kontrolliert werden.

Der genetische Algorithmus muss nun eine Zielfunktion unter Nebenbedingungen optimieren. In der Literatur werden diverse Methoden zur Optimierung mit genetischen Algorithmen unter Nebenbedingungen diskutiert.

Eine Möglichkeit sind restriktionserhaltende Operatoren. Mutations- und Rekombinationsoperatoren sind dabei so angelegt, dass sie von einer gültigen Lösung nur in eine weiterhin gültige Lösung wechseln können. Eine weitere Möglichkeit sind Reparaturmechanismen, die als zusätzliche Operatoren unzulässige Lösungen in zulässige überführen.

Eine der gängigeren Möglichkeiten sind Straffunktionen. Die Zielfunktion wird hierbei mit einem von der Stärke der Restriktionsverletzung abhängigen Strafterm beaufschlagt.<sup>48</sup>

Eine Restriktionsverletzung ist im vorliegenden Fall eine Unterschreitung des Mindest-Servicegrads. Eine solche Unterschreitung kann nur bei Produkten mit Primärnachfrage auftreten, weil ein (starrer) Produktionsplan mit konstanten Vorlaufzeiten verwendet wird. Die in Kapitel 4.2.3.1 beschriebene Flexibilisierung ist ebenfalls so angelegt, dass bei Vorprodukten keine Fehlmengen entstehen können.

---

<sup>47</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 368 und Axsäter (2000), S. 26.

<sup>48</sup> Vgl. Hammel / Bäck (1998), S. 20.

Es stellt sich nun die Frage, wie die Straffunktion aussehen soll. Goldberg schlägt vor, die Summe der quadrierten Abweichungen zur Zielfunktion zu addieren:<sup>49</sup>

$$\text{Minimiere } f(x) + r \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (4.7)$$

$f(x)$  ist die Zielfunktion,  $n$  ist die Anzahl der Abweichungen und  $d_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  die jeweilige Abweichung.  $r$  ist ein Strafkoeffizient. Der Vorteil der Quadrierung ist, dass kleine Abweichungen vergleichsweise geringer bestraft werden.

Michalewicz verwendet einen dynamischen Strafkostensatz, der abhängig von der aktuellen Generationenzahl ist:<sup>50</sup>

$$\text{Minimiere } f(x) + r \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^p \cdot \bar{f} \cdot \sum_{i=1}^n d_i \quad (4.8)$$

Die Variable  $t$  ist die aktuelle Generationenzahl,  $T$  ist die Gesamtanzahl der vorgesehenen Generationen,  $p$  gibt die Stärke der Progression bei steigender Generationenzahl an und  $\bar{f}$  ist die mittlere Fitness der Population. Der Term  $t/T$  soll bei fortschreitender Optimierung die Strafkosten erhöhen und damit tendenziell mehr zulässige Lösungen in der Population bewirken.

Die mittlere Fitness der Population  $\bar{f}$  einzubringen, erscheint sinnvoll, um eine Bestrafung nicht unabhängig von der Größenordnung des unbestraften Zielfunktionswerts durchzuführen. Somit wird möglicherweise die Anpassung des Parameters  $r$  (siehe unten) bei einer Optimierung einer neuen Problemgruppe mit Zielfunktionswerten in anderer Größenordnung vermieden.

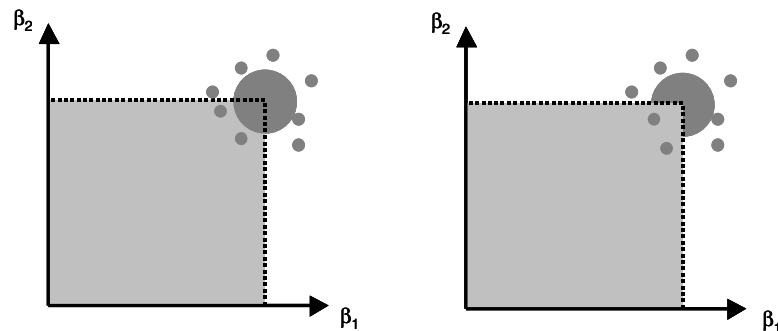
Bei der Implementierung fiel die Entscheidung nach umfangreichen Tests für die Variante von Michalewicz, ergänzt um die Quadrierung der Abweichungen nach Goldberg, um die Vorteile beider Varianten zu nutzen.

Dem Parameter  $r$  ist besondere Beachtung zu schenken, denn hier wird die Stärke der Strafe eingestellt und damit der Strafterm an den Anwendungsfall angepasst.  $r$  ist so festzulegen, dass die Höhe einer Bestrafung mindestens den Kosten entspricht, die nötig wären, um eine unzulässige Lösung in eine zulässige zu überführen. Eine derartige Festlegung ist im vorliegenden Fall nicht einfach. Beim Experimentieren hat sich eine Faustregel bewährt: Die Bestra-

<sup>49</sup> Vgl. Goldberg (1989), S. 85, 86.

<sup>50</sup> Vgl. Michalewicz (1994), S. 134.

fung ist so einzustellen, dass immer etwa die Hälfte der Individuen einer Generation eine unzulässige Lösung (mit Strafkostenzuschlag) aufweisen.



**Abbildung 9:** Servicegrad-Nebenbedingung

Somit liefert der genetische Algorithmus als Endergebnis oft keine zulässige Lösung. Ein im nächsten Kapitel beschriebenes Modul überführt dann eine unzulässige Lösung in eine zulässige. Bemerkenswert ist, dass diese Lösung nach bisherigen Erfahrungen besser ist, als diejenige mit stärkeren Strafen (höheres  $r$ ) und damit selteneren unzulässigen Lösungen des genetischen Algorithmus. Abbildung 9 zeigt den Sachverhalt für zwei Produkte. Der graue Kasten entspricht den Kombinationen mit zu niedrigem Servicegrad. Der große dunkle Kreis entspricht dem Bereich des Servicegrads der meisten Individuen und die kleinen Punkte sind vereinzelte Individuen. Das Optimum befindet sich in der rechten oberen Ecke des Kastens, weil dort der zulässige minimale Servicegrad für beide Produkte liegt und damit die niedrigsten Kosten für Sicherheitsbestände erreicht werden.

Im linken Bild sind die Individuen mit und ohne Strafbuschlag gleichberechtigt um das Optimum verteilt. Im rechten Bild sind die restriktionsverletzenden Individuum so stark bestraft, dass sie sich nicht mehr in der Population durchsetzen können und die Suche nur im Bereich außerhalb des grauen Kastens stattfindet. Es ist leicht einzusehen, dass die linke Version besser sein muss, denn dort nähert sich die Population von allen Seiten gleichberechtigt dem Optimum.

Für die Experimente (siehe Kapitel 5) wurde  $r = 1500$  und  $p = 0,25$  verwendet.  $d_i$  ist die Abweichung der einzelnen Servicegrade und ergibt sich aus  $d_i = \min(\beta_i^{\min} - \beta_i, 0)$ ,  $0 \leq \beta_i \leq 1$ .

$\beta_i^{\min}$  ist der Mindest-Servicegrad und  $\beta_i$  ist der mit der Simulation erzielte Servicegrad des jeweiligen Individuums.

#### 4.3.3.2 Gezielte Genauigkeitsreduktion durch statistische Tests

Wenn der Optimierer in Kombination mit der Simulation verwendet wird, stellt sich die Frage, ob jedes Simulationsergebnis die gleiche Genauigkeit aufweisen muss. Die Genauigkeit drückt sich durch die Größe der Varianz bzw. die Breite des Konfidenzintervalls der simulierten Gesamtkosten aus. Diese werden wiederum durch die Anzahl der simulierten Umweltlagen determiniert.

Das Endergebnis soll mit einer vorher festgelegten maximalen Genauigkeit vorliegen. Wenn ein bisher bestes Ergebnis mit einem bestimmten Zielfunktionswert bekannt ist, ist es nicht sinnvoll einen Simulationslauf mit gleicher Ergebnisgenauigkeit durchzuführen, wenn absehbar ist, dass der bisher beste Zielfunktionswert damit nicht verbessert werden kann. Sobald sich also abzeichnet, dass ein Ergebnis nicht besser werden kann als das bisher beste, wird abgebrochen und damit eine reduzierte Genauigkeit in Kauf genommen.

Auch im Rahmen der Optimierung mit dem genetischen Algorithmus, wenn alle Individuen einer Population einen Fitnesswert zugeordnet bekommen müssen, weil die Paarselektion den Fitnesswert als Ausgangspunkt verwendet, ist eine Genauigkeitsreduktion sinnvoll.

Der favorisierte Paarselektionsoperator „Roulette Wheel“ wählt die Paare für die Rekombination nicht nur abhängig von deren Fitness aus, sondern verwendet einen zufälligen Einfluss, um auch Paare mit stark verschiedenen Fitnesswerten zu rekombinieren.<sup>51</sup>

Eine verminderte Genauigkeit der Fitnesswerte, könnte eine ähnlich positive Wirkung auf das Ergebnis haben wie der Zufallseinfluss der „Roulette Wheel“-Strategie. Auch wenn die Optimierungsergebnisse etwas schlechter sind, sollte die Optimierungszeit mit diesem Verfahren so stark verkürzt werden, dass innerhalb der gesparten Zeit, die Anzahl der Generationen vervielfacht und damit ein wesentlich besseres Ergebnis erreicht werden könnte.

---

<sup>51</sup> Vgl. Wirawan (2002), S. 33.

Hammel / Bäck unterstützen diese Überlegungen: „Die Unempfindlichkeit evolutionärer Algorithmen gegenüber stochastischen Einflüssen kann zur Beschleunigung des Suchprozesses ausgenutzt werden, indem fallweise Zielfunktionswerte unter Verwendung schneller zu berechnender Ersatzzielfunktionen oder einfacherer Modelle approximiert werden“.<sup>52</sup>

Um nun eine solche Abbruchentscheidung zu treffen, bietet sich folgende Bedingung an:

$$\bar{F}^* < \bar{F} - D^{\text{konfint}} \quad (4.9)$$

Dabei stellt  $\bar{F}^*$  den besten bekannten Fitnesswert dar,  $\bar{F}$  ist der aktuelle Fitnesswert des neuen Individuums. Beides sind die jeweiligen Mittelwerte der Gesamtlagerkosten über die simulierten Umweltlagen.  $D^{\text{konfint}}$  ist das Konfidenzintervall für die Differenz dieser beiden Mittelwerte. Trifft die Bedingung zu, kann mit der Sicherheit des verwendeten Signifikanzniveaus die Fitness des aktuellen Individuums nicht niedriger werden als der bisher beste Wert.

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern, werden für alle Simulationen die gleichen Zufallsströme verwendet. Es handelt sich somit um verbundene Stichproben. Zur Bestimmung des Konfidenzintervalls der Differenz zweier arithmetischer Mittel von verbundenen Stichproben bietet sich der sogenannte Paired-t-Approach an. Dieser benötigt allerdings nicht den Mittelwert und die Varianz beider zu vergleichender Reihen, sondern den Mittelwert und die Varianz der paarweisen Vergleiche (Differenzen).<sup>53</sup>

Zu jedem besten Individuum muss demnach ein Vektor mit den Fitnesswerten für alle Umweltlagen vorgehalten werden und der Simulation für alle weiteren Individuen vorliegen, falls die Genauigkeitsreduktion durchgeführt werden soll.

---

<sup>52</sup> Hammel / Bäck (1998), S. 19.

<sup>53</sup> Vgl. Law / Kelton (1991), S. 587.

Die Abbruchbedingung mit dem Paired-t-Approach sieht nun folgendermaßen aus:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i < \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - t_{1-\alpha/2}^{n-1} \cdot \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (4.10)$$

$x_i$  sind die Ergebnisse (Kosten) der Umweltlagen  $i = 1, \dots, n$  des besten Individuums.  $n$  ist die Anzahl der Umweltlagen bis zum aktuellen Abbruchentscheidungszeitpunkt. Da das beste Individuum immer mit der maximalen Genauigkeit beurteilt wird, ist  $x_i$  mit  $i = 1, \dots, n$  nur der Anfang der kompletten Umweltlagenreihe für das beste Individuum.  $y_i$  sind die Ergebnisse des neuen Individuums, für das gegebenenfalls die Genauigkeit reduziert werden soll. Die Varianz der paarweisen Differenzen berechnet sich folgendermaßen, wobei der rechte Term Vorteile bei der Implementierung bietet.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n d_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n d_i \right)^2 \right] \quad (4.11)$$

$$d_i = x_i - y_i \quad (4.12)$$

Nach dem Gesetz der großen Zahlen sind zufallsabhängige Ergebnisse bei kleinem  $n$  wenig aussagekräftig. Aus diesem Grund wird die Abbruchbedingung erst für  $n > 30$  überprüft. Ist die Abbruchbedingung bis zur maximalen Genauigkeit nicht erreicht, wird an dieser Stelle abgebrochen, denn eine größere Genauigkeit ist nicht erforderlich.

Bezüglich der statistischen Signifikanz muss allerdings auf eine Einschränkung dieses Verfahrens hingewiesen werden. Wenn eine Reihe von Alternativen mit statistischen Hypothesentests (oder Konvergenzintervallen) verglichen werden, muss eine Korrektur des Signifikanzniveaus vorgenommen werden.

Das Signifikanzniveau eines einzelnen Vergleichs ist  $\alpha$ . Sobald mehrere nicht unabhängige Vergleiche nacheinander durchgeführt werden, steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit an.

Die Bonferroni-Ungleichung legt eine obere Schranke für die Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit fest:<sup>54</sup>

$$\alpha_E \leq \sum_{i=1}^m \alpha_i \quad (4.13)$$

$m$  ist die Anzahl der gemachten Aussagen bzw. Vergleiche.  $\alpha_i$  sind die Signifikanzniveaus der einzelnen Aussagen und  $\alpha_E$  ist das Gesamtsignifikanzniveau, also die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine Aussage fehlerhaft ist.

Bestimmt man nun diese Schranke für ein Optimierungsergebnis des genetischen Algorithmus, kommt man beispielsweise zu folgendem Ergebnis. Es werden 80 Generationen mit 50 Individuen pro Population verwendet. Das einzelne Signifikanzniveau liegt bei 5 %. Es wird zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass nur ein Vergleich pro neuem Individuum stattfindet und nicht für jede Umweltlage ab der dreißigsten. Damit finden  $50 * 80 = 4.000$  Vergleiche statt. Die obere Schranke nach der Bonferroni-Ungleichung für das Gesamtsignifikanzniveau liegt damit bei  $4.000 * 0,01 = 200$ , was keinen Sinn ergibt. Hoover empfiehlt deshalb Vergleiche solcher Art nur in kleiner Anzahl durchzuführen und ansonsten andere Vergleichsmethoden zu verwenden.

Da die vorliegende Optimierung und Simulation in Kombination mit der Abbruchbedingung über den paired-t-Approach erfahrungsgemäss gute Ergebnisse liefert, wird das Verfahren trotzdem nicht verworfen. Erstens handelt es sich nur um eine obere Schranke, die vielleicht nicht viel über den wirklichen Wert aussagt, zweitens sind genetische Algorithmen besonders robust gegen Zufallseinflüsse und Ungenauigkeiten der Zielfunktion<sup>55</sup>, drittens hat nicht jeder Vergleich einen besonderen Stellenwert. Direkte Konsequenzen hätte beispielsweise nur der fälschliche Abbruch einer Umweltlagenreihe, die bei maximaler Genauigkeit das beste Individuum übertreffen würde. Alle anderen Abbruchentscheidungen haben keine direkten Auswirkungen auf das Endergebnis.

Zur Absenkung des Gesamtsignifikanzniveaus wird dennoch ein möglichst kleines Einzelsignifikanzniveau verwendet. Mit einem Einzelsignifikanzniveau von 0,02 % liegt die durchschnittliche Anzahl von simulierten Umweltlagen er-

---

<sup>54</sup> Vgl. Hoover / Perry (1990), S. 350-352.

<sup>55</sup> Vgl. Hammel / Bäck (1998), S. 19.

fahrungsgemäss bei ca. 32, wenn 30 die Anzahl ist, ab der das Abbruchkriterium überprüft wird. Damit ergeben sich bei einer maximalen Genauigkeit von 100 Umweltlagen eine Verkürzung der Gesamtoptimierungszeit um ca. 68 %.

#### 4.3.3.3 Zusatzmodul Feinsuche

Die Stärke von genetischen Algorithmen liegt in der Fähigkeit, in hochkomplexen Suchräumen in die Nähe des globalen Optimums zu gelangen. Ist das globale Optimum, oder das Optimum, von dem man sich erhofft, dass es das globale Optimum ist, in der Nähe, ist die evolutionsartige Breitensuche im Vergleich zu einer direkten Suchstrategie mit einelementiger Suchmenge im Nachteil.<sup>56</sup> Aus diesem Grund wurde noch ein Modul zu Feinsuche hinter den genetischen Algorithmus geschaltet.

Der erste Teil dieser Feinsuche hat zum Ziel, eine bisher unzulässige Lösung (siehe Kapitel 4.3.3.1) in eine zulässige zu überführen. Die Unzulässigkeit drückt sich in einem  $\beta$ -Servicegrad kleiner des vorgegebenen Mindest- $\beta$ -Servicegrads aus.

In einem iterativen Verfahren werden nun abwechselnd alle Produktsicherheitsbestände, deren Servicegrad zu niedrig ist, prozentual (z.B. um 1,5 %) erhöht. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis alle Servicegrade zufriedenstellende Höhen aufweisen.

Da - wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben - Abhängigkeiten zwischen den Sicherheitsbeständen bestehen, können diese nicht unabhängig erhöht werden bis der zugehörige Servicegrad die nötige Schwelle erreicht. Denn erstens kann durch die Erhöhung eines Sicherheitsbestands der Servicegrad eines anderen, der zuvor schon ausreichend erhöht wurde, wieder unter das Limit fallen. Zweitens würden sich die Verhältnisse der einzelnen Sicherheitsbestände zueinander möglicherweise verschieben. Aus diesem Grund wird versucht, alle zu niedrigen Sicherheitsbestände gleichmäßig anzuheben. Es bestände ansonsten die Gefahr, sich von dem globalen Optimum zu entfernen anstatt zu nähern.

---

<sup>56</sup> Vgl. Nissen (1998), S. 62.

Wenn man sich die Abbildung 2 aus Kapitel 3.1 wieder vor Augen führt, wird klar, dass mit einer Erhöhung der Sicherheitsbestände jeder beliebige Servicegrad erreicht werden kann, auch wenn Abhängigkeiten bestehen. Das beschriebene Verfahren führt somit zwingend zu einer zulässigen Lösung.

Bei der Überführung einer unzulässigen Lösung in eine zulässige können sich die Kostenverhältnisse zwischen der vorher besten Lösung zu den nächstbesten Lösungen verschieben. Deshalb wird das beschriebene Verfahren nicht nur für die beste sondern auch für vier nächstbesten Lösungen durchgeführt und die danach beste *gültige* Lösung weiterverwendet. Zusätzlich wird *während* der Optimierung mit dem genetischen Algorithmus die beste gefundene *gültige* Lösung gespeichert, mit der besten gültigen aus dem obigen Verfahren verglichen und bei Verbesserung übernommen.

Ausgehend von dieser zulässigen Lösung wird nun versucht, mit kleinen Einzelschritten dem globalen Optimum näher zu kommen. Dieser zweite Teil der Feinsuche ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Die Verminderungen bzw. Erhöhungen der zufällig ausgewählten Sicherheitsbestände erfolgen mit einer normalverteilten Zufallsvariable. Um die richtige Richtung der Variation zu erhalten, wird der Betrag der Zufallsvariable zuerst negiert (Verminderung) und danach nicht negiert (Erhöhung) auf den Sicherheitsbestandswert addiert. Die Verminderung wird zuerst getestet, weil erfahrungsgemäß fast nur Verminderungen bei der Feinsuche durchgeführt werden.

Die Standardabweichung der Zufallsvariable wird bei  $k$  Veränderungen ohne Verbesserung verringert. Ist eine Veränderung erfolgreich, wird versucht mit einer wiederholten Veränderung in die gleiche Richtung und gleicher Höhe, die Zielfunktion weiter zu verbessern. Wenn der erste Verminderungsversuch scheitert, wird eine betragsmäßig gleiche Erhöhung versucht.

Aus dem Diagramm ist nicht ersichtlich, dass bei mindestens einer Verbesserung durch Verminderung direkt anschließend keine Erhöhung durchgeführt wird, denn diese würde nur die letzte erfolgreiche Verminderung rückgängig machen.

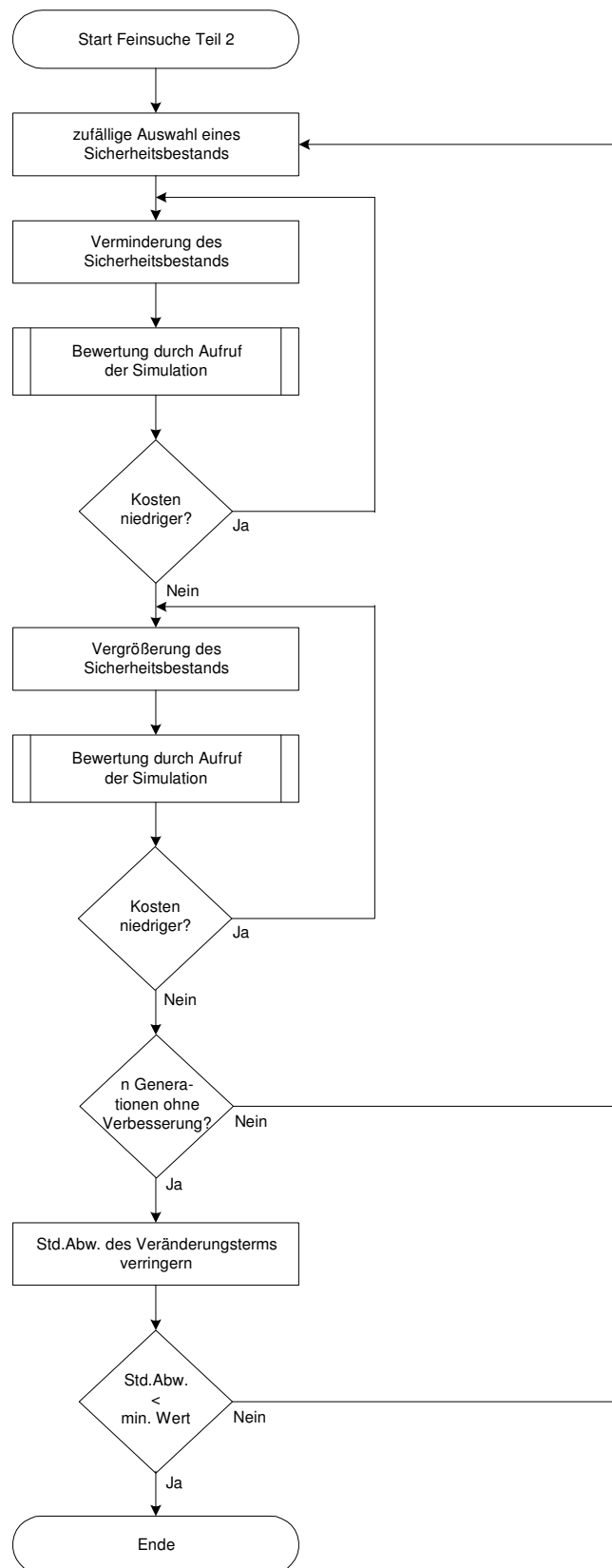


Abbildung 10: Ablauf der Feinsuche

#### 4.3.3.4 Operatoren des genetischen Algorithmus

Es wurden diverse neue Rekombinations-, Parselektions und Mutationsoperatoren implementiert.

Neben der bisherigen One-Point-Crossover-Rekombination<sup>57</sup> gibt es nun eine Two-Point-Crossover-Rekombination. Diese legt zufällig zwei Schnittstellen im Genvektor fest und tauscht die Gene zwischen diesen beiden Punkten aus. Beispiel: Die Eltern-Individuen sind  $A = (1, 1, 1, 1, 1, 1)$  und  $B = (2, 2, 2, 2, 2, 2)$ . Die beiden Schnittstellen liegen zufällig zwischen dem zweiten und dritten Gen und zwischen dem vierten und fünften Gen. Die beiden resultierenden Kinder-Individuen lauten dann  $A' = (1, 1, 2, 2, 1, 1)$  und  $B' = (2, 2, 1, 1, 2, 2)$ .

Des Weiteren wurden zwei intermediane Rekombinationsoperatoren implementiert. Der erste bestimmt paarweise die Mittelwerte zwischen allen Sicherheitsbestandgenwerten und verteilt diese mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % zufällig auf den einen oder den anderen Elternteil, die dann die beiden neuen Individuen ergeben. Beispiel: Die Genwerte der Eltern sind 1.0 und 2.0, mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 50 % sind die neuen Gene 1.0 und 1.5 oder 1.5 und 2.0.

Der andere intermediane Operator teilt paarweise die Differenz zwischen zwei korrespondierenden Genen durch 3 und addiert bzw. subtrahiert zu allen Genen den Betrag dieses Drittels so, dass es in Richtung des andern Gens tendiert. Beispiel: Die Genwerte der Eltern sind 1 und 4, dann sind die beiden neuen Gene 2 und 3.

Der vierte neue Rekombinationsoperator wird in der Literatur Uniform-Crossover genannt.<sup>58</sup> Er tauscht Gene mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % zwischen den beiden Eltern aus.

Bei Tests hat der Two-Point-Crossover-Operator am besten abgeschnitten.

Die "Roulette-Wheel"-Parselektion<sup>59</sup> wurde von Kempkes nicht vollständig implementiert. Dies wurde nachgeholt und zusätzlich die Möglichkeit der Einstreuerung der bisher besten Individuen hinzugefügt.

---

<sup>57</sup> Vgl. Kempkes (2002), S. 46.

<sup>58</sup> Vgl. Hammel / Bäck (1998), S. 9.

<sup>59</sup> Vgl. Nissen (1998), S. 66.

Im Vergleich zur Elitism-Strategie<sup>60</sup> erwies sich dieser neue Operator als besser. Der Mutationsoperator von Kempkes lieferte keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Zum einen werden die Mutationsschritte gleichverteilt gezogen, obwohl in der Literatur nur normalverteilte Mutationen empfohlen werden.<sup>61</sup> Zum anderen verwendet die Mutation zwar korrekterweise das jeweilige Gen des besten Individuums als Ausgangspunkt, doch der Mittelwert des gleichverteilten neuen Gens liegt durch die Art der Implementierung nicht auf dem Wert des bisher besten. Somit hat die Suche grundlos immer eine Tendenz in eine bestimmte Richtung.

Des Weiteren wird die Mutationsschrittweite bei fortschreitender Optimierung nur verkleinert, wenn ein neues bestes Individuum gefunden wurde. Das Problem bei dieser Verfahrensweise ist, dass die Suche in einem groben Suchbereich stecken bleiben kann, wenn keine regelmäßige Verbesserung eintritt und dann bei Erreichen einer maximalen Generationenanzahl abbricht.

Um die genannten Probleme zu beheben, wurde ein neuer Mutationsoperator implementiert, der normalverteilt um das jeweilige Gen des besten Individuums „mutiert“. Die Standardabweichung der normalverteilten Zufallsvariable wird abhängig von  $\frac{t}{T}$  bei fortschreitender Optimierung verkleinert.  $T$  ist die Gesamtzahl der geplanten Generationen und  $t$  ist die aktuelle Generationenanzahl. Dies hat den Vorteil, dass bei jeder Vorgabe der Gesamtanzahl der Generationen  $T$  der Schrittweitenbereich der Mutation gleich bleibt.

Der Anfangswert (erste Generation) und Endwert (letzte Generation) für die Standardabweichung der Mutation kann in der Parameterdatei festgelegt werden. Die Entwicklung vom Anfangs- zum Endwert erfolgt linear.

Zusätzlich wurden noch Tests mit anwendungsbezogenen Mutationsoperatoren durchgeführt.

Es wurde ein Operator getestet, der speziell für die flexibilisierte Produktion den Sicherheitsbestand eines Produkts erhöht und im gleichen Zug die Sicherheitsbestände aller direkten Vorprodukte vermindert und umgekehrt. Dies basiert auf der grundsätzlichen Überlegung, dass höhere Vorproduktsicherheits-

---

<sup>60</sup> Vgl. Kempkes (2002), S. 33.

<sup>61</sup> Vgl. Hammel / Back (1998), S. 9 und Nissen (1998), S. 73.

bestände ein leichteres Auffüllen des Sicherheitsbestands des nachfolgenden Produkts ermöglichen und diesen dadurch entlasten.

Eine weiterer neuer Operator versucht, den Sicherheitsbestand eines Produkts einer bestimmten Ressource zu verkleinern und alle oder manche Sicherheitsbestände der anderen Produkte auf der gleichen Ressource zu vergrößern. Somit erhalten vielleicht diejenigen Produkte einen eher niedrigeren Sicherheitsbestand, die die Schlupfkapazitäten am effektivsten ausnutzen können.

Die beiden Operatoren wurden so getestet, dass in 50 % der Fälle der anwendungsneutrale Operator eingesetzt wurde und in jeweils 25 % der Fälle einer der beiden anwendungsbezogenen.

Im Vergleich zur ausschließlichen Verwendung des anwendungsneutralen Mutationsoperators erwies sich die Kombination mit Flexibilisierungs-Mutationsoperatoren als etwas besser in der Anfangsphase der Optimierung. Doch beim Endergebnis war nur eine kleine tendenzielle Verbesserung zu beobachten. Das Hauptproblem liegt in der Bestimmung passender Variationsverhältnisse der einzelnen Sicherheitsbestände zueinander. Wenn beispielsweise ein Sicherheitsbestand um 1 % verkleinert wird, um wieviel müssen dann zum Ausgleich die Sicherheitsbestände der Vorprodukte vergrößert werden?

Da für jede neue Produktionsstruktur die Mutationsoperatoren neu konfiguriert werden müssten, ist das Verfahren viel aufwendiger als die Verwendung des anwendungsneutralen Operators. Deshalb wurden diese Operatoren wieder verworfen.

Die Mechanismen der Evolution scheinen so effizient zu sein, dass sie auch ohne Kenntnis der Problemstruktur gute Ergebnisse liefern.

#### **4.4 Verifikation und Validierung des Modells**

In Kapitel 4.2.1 kam die Notwendigkeit von Verifikation und Validierung zum Ausdruck.

Eine Verifikation des Simulationsmodells wurde anhand eines speziell für diesen Zweck implementierten Ausgabemoduls durchgeführt. Im Rahmen dieses Ausgabemoduls werden alle während der Simulation wichtigen Größen gesammelt und strukturiert in Tabellenform ausgegeben.

---

Im einzelnen liegen folgende Größen für jede simulierte Umweltlage, jedes Produkt und jede einzelne Periode vor:

- Lageranfangsbestand am Anfang und am Ende einer Periode (der Endbestand ist äquivalent zum nächsten Anfangsbestand)
- Vorgegebene Losgröße aus dem Produktionsplan
- Neue Losgröße durch flexibilisierte Produktion
- Erwartete Primärnachfrage
- Aufgetretene Primärnachfrage
- Ursprüngliche Sekundärnachfrage anhand des Produktionsplans
- Neue Sekundärnachfrage durch flexibilisierte Produktion
- Aufgetretene Fehlmengen
- Alte noch nicht erfüllte Backorders aus den letzten Perioden
- Rüstkosten
- Lagerkosten
- Fehlmengenkosten
- Gesamtkosten (für eine Periode eines Produkts einer Umweltlage)

Die Kostengrößen werden zusätzlich jeweils über alle Perioden und Produkte kumuliert.

Nach Beendigung der Simulation können diese Informationen zum Nachvollziehen aller wichtigen Einzelschritte der Simulation verwendet werden. Dieses Nachvollziehen wurde ausgiebig durchgeführt. Es wurde damit versucht die Korrektheit der Simulationsschritte zu überprüfen und damit die Simulation zu verifizieren.

Der Optimierer besitzt gleichfalls in allen Modulen einschaltbare Kontrollausgaben, die alle Abläufe gut dokumentieren. Hiermit wurde durch schrittweises Verfolgen der Optimierung ebenfalls versucht, mögliche Implementierungsfehler aufzudecken.

Ein weiterer wichtiger Beitrag zur Verifikation des Gesamtsystems ergibt sich aus Ergebnisvergleichen mit dem in Kapitel 3.3.3 kurz beschriebenen LP-Modell. Sowohl die Ergebnisse (Sicherheitsbestandshöhen) des LP-Modells als

auch die Ergebnisse aus dem Fehlmengenerfassungsverfahren aus Kapitel 3.3.2 und auch die Ergebnisse des Optimierers mit Simulation stimmen überein. Die Optimierung mit Simulation verwendete in diesem Fall nur starre Produktionspläne, da die beiden anderen Verfahren ausschließlich für starre Produktionspläne ausgelegt sind.

Da sowohl das LP-Modell als auch das Simulationsmodell auf dem gleichen formalen Modell basieren aber völlig unterschiedliche Umsetzungen aufweisen, kann aufgrund der Ergebnisübereinstimmung von einer gegenseitigen Verifikation gesprochen werden.

Eine Validierung durch einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit einem realen System war aus naheliegenden Gründen nicht möglich. In der Literatur werden teilweise Vergleiche mit analytischen Modellen nicht nur zur Verifikation, sondern auch als sogenannte theoriebezogene Validierung bezeichnet. Eine solche Validierung muss allerdings kritisch hinterfragt werden, denn ein analytisches Modell ist oft weiter von der Realität entfernt als ein Simulationsmodell.<sup>62</sup> Folglich sind Vergleiche mit analytischen Verfahren zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen, beispielsweise mit (mehrstufigen) Lagerhaltungspolitiken (siehe Kapitel 3.1), auch keine Validierung im engeren Sinne und wurden deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht als notwendig erachtet.

---

<sup>62</sup> Vgl. Sauerbier (1999), S. 116f.

## 5 Experimentelle Analyse von Wirkungszusammenhängen bei der Sicherheitsbestandsbestimmung

Nachdem in den letzten Kapiteln Verfahren zur Sicherheitsbestandsbestimmung beschrieben wurden, wird nun experimentell gezeigt, dass diese unter verschiedenen Rahmenbedingungen einsetzbar sind. Weiterhin wird untersucht, welche Wirkung bestimmte Rahmenbedingungen auf die benötigte Sicherheitsbestandshöhe haben.

Dazu wird in Kapitel 5.1 zuerst die Vorbereitung der Experimente und deren Durchführung beschrieben. Danach folgt mit Kapitel 5.2 die Präsentation und Auswertung der Ergebnisse.

### 5.1 Vorbereitung und Durchführung der Untersuchung

#### 5.1.1 Vorbereitung der Testinstanzen

Um der Analyse eine möglichst breite Basis zu bieten, sollen viele verschiedenartige Testinstanzen untersucht werden.

Als Grundlage für die Testinstanzen bietet sich eine Testinstanzensammlung aus einer anderen Untersuchung von Stadtler an, die eine intern rollierende Lösung von Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problemen (MLCLSP) propagiert.<sup>63</sup> Die Testinstanzen werden durch Kombination von verschiedenen Optionen determiniert. Folgende Optionen wurden ausgewählt:

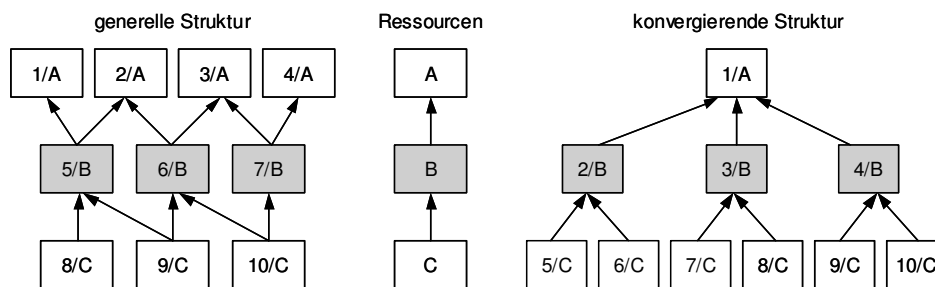
- Produktionsstruktur (generell/konvergierend)
- Koeffizient der Nachfrageschwankungen (schwach/stark)
- Auslastung (hoch/mittel/zu Endprodukten hin abnehmend/zu Endprodukten hin zunehmend)
- Zeit zwischen Losauflagen – Time between orders (TBO) (alle Ressourcen gleich/zu Endprodukten hin abnehmend)
- Saisonaler Verlauf der Nachfrage (keiner/leicht/stark)

Es werden nur azyklische Strukturen ohne Rüstzeiten verwendet. Kombiniert man alle diese Optionen beliebig miteinander so erhält man 96 verschiedene

---

<sup>63</sup> Vgl. Stadtler (2000b).

Testinstanzen. Die genaue Ausprägung der einzelnen Optionen sowie weitere Details sind aus der Beschreibung der Testinstanzen zu entnehmen.<sup>64</sup>



**Abbildung 11:** Produktionsstrukturen des Modells A+

Die einfachste Testinstanzgruppe A+ soll für die vorliegende Untersuchung ausreichen, um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten. Abbildung 11 zeigt die Gozinto-Beziehungen der generellen und konvergierenden Struktur des Modells A+. Die Zahlen in der Abbildung geben die Nummern der Produkte an und Buchstaben die Ressourcen. Es handelt sich um drei Stufen mit jeweils einer Produktionsressource, im Fall der generellen Struktur vier End-, drei Zwischen- und drei Vorprodukte, für die konvergierende Struktur sind es ein Endprodukt, drei Zwischen- und sechs Vorprodukte. Der Planungszeitraum umfasst 24 Perioden.

Bei den Testinstanzen liegt für ein Produkt entweder nur Primär- oder Sekundärbedarf vor. Modelle, bei denen für Produkte beide Nachfragearten auftreten, wären auch interessant, sprengen aber den Rahmen dieser Arbeit. Gleichfalls könnten serielle Strukturen durch ihre Einfachheit nützliche Erkenntnisse liefern, worauf hier aber auch verzichtet wird.

Da für die Bestimmung der Sicherheitsbestände ein Produktionsplan benötigt wird, kann das oben erwähnte Verfahren zur rollierenden Lösung des MLCLSP verwendet werden, weil es in relativ kurzer Zeit gute Ergebnisse liefert.

Es handelt sich bei dem MLCLSP um ein Verfahren mit Mixed Integer Programming (MIP). Die Ergebnisse des MLCLSP werden im weiteren Verlauf der Arbeit als MIP-Lösung bezeichnet.

<sup>64</sup> Vgl. Stadler / Sürle (2000).

Das ursprüngliche Verfahren von Stadtler sieht eine Vorlaufzeit von null vor. Das MLCLSP-Modell wurde so erweitert, dass nun auch Modelle mit einer Vorlaufzeit von einer Periode (Produktionszeit) gelöst werden können. Mit einer Vorlaufzeit von einer Periode würde es bei einer dreistufigen Struktur zwei Perioden dauern, bis die ersten Endprodukte produziert werden könnten. Da die Bestimmung von Sicherheitsbeständen mit und ohne Vorlaufzeiten möglichst unter gleichen Vorraussetzungen verglichen werden soll, muss ein Verfahren gefunden werden, dass nicht die Produktions- oder Nachfragemenge in den ersten Perioden reduziert. Die umgesetzte Variante gibt für alle End- und Zwischenprodukte die benötigten Vorprodukte als Anfangsbestände vor, so dass sie für die Produktion in den ersten Perioden ausreichen. Somit kann jedes Produkt ab der ersten Periode gefertigt und nachgefragt werden. Um die Gesamtproduktionsmenge nicht zu verfälschen, werden die am Anfang vorgegebenen Bestände in der Modellgleichung als in der letzten Periode des Planungszeitraums zu erreichende Endbestände vorgegeben.

Um den Zeitaufwand bei der Berechnung der Testinstanzen nicht zu sprengen, werden nicht alle 96 oben genannten Testinstanzen auch mit Vorlaufzeit untersucht, sondern nur 16. Sie ergeben sich aus folgenden Optionen:

- Produktionsstruktur (generell/konvergierend)
- Auslastung (hoch/mittel)
- Zeit zwischen Losauflagen (alle Ressourcen gleich/zu Endprodukten hin abnehmend)
- Saisonaler Verlauf der Nachfrage (keiner/leicht)

Zu den 96 + 16 bisher genannten Kombinationen kommen noch zwei Optionen aus der Simulation hinzu. Zum einen ist es die Behandlung der Fehlmengen als Lost-Sales oder als Backorders, zum anderen die Bestimmung der Sicherheitsbestände für starre oder flexibilisierte Produktionspläne. Somit ergeben sich insgesamt  $(96 + 16) * 4 = 448$  verschiedene Testfälle.

### 5.1.2 Parameter für Simulation und Optimierer

Der genetische Algorithmus optimiert immer genau über 80 Generationen. Eine Population umfasst 50 Individuen, es werden immer die fünf besten Indi-

viduen wieder in eine neue Generation mit Hilfe des „Roulette Wheel“-Verfahrens eingestreut.

Für den genetischen Algorithmus erwies sich das Rekombinationsverfahren Two-Point-Crossover am geeignetsten, sowie die Roulette-Wheel-Paarselektionsstrategie ohne mehrfache Selektion.

Die Mutationswahrscheinlichkeit ist auf 10 % und die Rekombinationswahrscheinlichkeit auf 40 % festgelegt.

Alle Individuen mit  $\beta$ -Servicegrad kleiner als 98 % werden mit Strafterm versehen. Dies entspricht auch dem Ziel-Servicegrad.

Die Simulation eines Individuums läuft im Minimum über 30 und maximal über 100 Umweltlagen. Der Abbruch mittels des Paired-t-Approach erfolgt mit einem Signifikanzniveau von 0,02 %.

Die Produktionsstruktur zusammen mit den erwarteten Nachfrageverläufen muss für die Simulation jeder Testinstanz in Dateiform vorliegen. Es wurde ein spezieller Übersetzer erstellt, der die Eingangsdateien der MIP-Lösung in das benötigte Dateiformat transformiert. Das Dateiformat ist in der Arbeit von Wirawan detailliert beschrieben.<sup>65</sup>

Der Produktionsplan basiert auf variierenden Nachfrageverläufen. Diese perioden- und produktabhängigen Nachfragen werden innerhalb der Simulation periodenweise als Erwartungswerte einer normalverteilten Zufallsvariable zur Bestimmung der tatsächlichen Nachfrageausprägungen verwendet. Die Standardabweichung dieser Zufallsvariable ergibt sich aus 25 % der mittleren Nachfrage der MIP-Lösung über alle Perioden.

### 5.1.3 Berechnung der Kennzahlen

Für jede Testinstanz werden eine Reihe von Kennzahlen berechnet und ausgegeben. Die Auswertung der Ergebnisse in Kapitel 5.2 basiert auf diesen Zahlen. Die meisten Kennzahlen liegen produktabhängig vor, werden aber zur leichteren Auswertung entweder über alle Produkte kumuliert oder auch nach Produkten mit und ohne Primärnachfrage gruppiert kumuliert.

---

<sup>65</sup> Vgl. Wirawan (2002), S. 18-40.

Bevor die eigentlichen Kennzahlen beschrieben werden, müssen zuerst die verwendeten Indizes und Variablen eingeführt werden:

$t = 1, \dots, T$	Perioden
$s = 1, \dots, S$	Umweltlagen
$j = 1, \dots, J$	Produkte
$m = 1, \dots, M$	Ressourcen
$n = 1, \dots, N$	Testfälle innerhalb einer bestimmten Gruppe
$I_{jts}$	Lagerendbestand für Produkt $j$ , in Periode $t$ und Umweltlage $s$
$SS_j^1$ und $SS_j^2$	erstes und zweites Sicherheitsbestandsniveau für Produkt $j$
$h_j$	Lagerkostensatz für Produkt $j$
$\bar{D}_j^{MIP}$	Der Mittelwert über alle im MIP verwendeten Nachfragen (Primär- und Sekundärnachfragen) für Produkt $j$
$D_{jts}$	Ausprägung einer Nachfrage in der Simulation für Produkt $j$
$P_{jts}$	Ausprägung einer Primärnachfrage in der Simulation für Produkt $j$
$LS_{jts}$	Fehlmenge für Produkt $j$ , Periode $t$ in Umweltlage $s$
$X_{jt}^{MIP}$	Losgröße aus dem MIP-Produktionsplan für Produkt $j$ und Periode $t$
$\Delta X_{jts}$	Änderung der Losgröße durch Flexibilisierung für Produkt $j$ , Periode $t$ in Umweltlage $s$
$Cap_{mt}$	Kapazität einer Produktionsressource $m$ in Periode $t$

Als zentrale Kennzahl berechnen sich die mittleren Gesamtlagerkosten als:

$$C^{Total} = \sum_{j=1}^J \left( h_j \cdot \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T I_{jts} \right) \quad (5.1)$$

Zu diesen Kosten wird ein Konfidenzintervall zum Signifikanzniveau von 5 % angegeben. Die Berechnung ist aus der Standardliteratur<sup>66</sup> für Statistik zu ent-

<sup>66</sup> Vgl. z.B. Hartung (2002), S. 130f.

nehmen. „(+/-)“ ist die Bezeichnung für das Konfidenzintervall in den Auswertungstabellen.

Um wieviel Prozent ein Ergebnis mit Flexibilisierung dasjenige ohne Flexibilisierung verbessert wird so bestimmt:

$$p^{flex-starr} = \sum_{n=1}^N \left( 1 - \frac{C^{TotalFlex}}{C^{TotalStarr}} \right) \quad (5.2)$$

Die Lagerkosten für Sicherheitsbestände werden folgendermaßen berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass der Sicherheitsbestand der Lagerbodensatz ist.

$$C_j^{SB} = h_j \cdot \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \text{Min}(SS_j^1, I_{jts}) \quad (5.3)$$

Die so bestimmten Sicherheitsbestandskosten spiegeln nur die Kosten für das erste Sicherheitsbestandsniveau wieder. Das zweite Sicherheitsbestandsniveau kann in obiger Formel nicht verwendet werden, weil dadurch anstelle des tatsächliche Sicherheitsbestand nur ein Zielwert verwendet würde. Die Auffüllhöhe (2. Sicherheitsbestand) ist der Wert, auf den der Sicherheitsbestand angehoben werden soll. Wenn man diesen zweiten Sicherheitsbestand anstelle des ersten in obiger Formel verwenden würde, ginge man davon aus, dass diese Höhe erreicht ist, wenn der Gesamtlagerbestand darüber hinaus geht. Dies wäre nicht korrekt.

Die Lagerkosten für die restlichen Bestände bestimmen sich als:

$$C_j^{Rest} = h_j \cdot \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T I_{jts} - C_j^{SB} \quad (5.4)$$

Der  $\beta$ -Servicegrad berechnet sich als:

$$\beta_j = 1 - \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T LS_{jts}}{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T P_{jts}} \quad (5.5)$$

Der Anteil der Perioden aus dem MIP-Plan, deren Lagerendbestand einer Periode größer als 5 % des mittleren Bedarfs ist, ist eine wichtige Kennzahl die ausdrückt, wie oft Los- oder Saisonalbestand vorhanden ist, der den Sicherheitsbestand in seiner Pufferwirkung unterstützen kann:

$$p_j^I = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \begin{cases} 1 & \forall t = 1, \dots, T \mid I_{jt}^{MIP} > 0,05 \cdot \bar{D}_j^{MIP} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.6)$$

Der Anteil der Perioden, in denen ein Los aufgelegt wird, ergibt sich aus:

$$p_j^X = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \begin{cases} 1 & \forall t = 1, \dots, T \mid X_{jt}^{MIP} > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.7)$$

In Kapitel 4.2.3.1 wurde erläutert, dass der Sicherheitsbestand nicht verbraucht werden darf. Die Kennzahl, über die dies kontrolliert werden kann, ist folgende:

$$p_j^{SB\text{-Übrig}} = \frac{1}{S} \left( \frac{\sum_{s=1}^S I_{jT} + \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T D_{jts} - S \cdot T \cdot \bar{D}_j^{MIP}}{SS_j^1} \right) - 1 \quad (5.8)$$

Sie gibt an, um wieviel Prozent der Sicherheitsbestand am Ende des Planungszeitraums im Mittel zu groß ist. Eine negative Zahl gibt an, dass ein entsprechender Anteil des Sicherheitsbestands am Ende fehlt. Die beiden Terme über dem Bruchstrich, mit denen die Nachfragen eingebracht werden, sollen eine Korrektur durchführen. Falls die aufgetretene Nachfrage größer als die erwartete Nachfrage ist, resultiert dies in geringerem Sicherheitsbestand am Ende eines Planungszeitraums und auch umgekehrt. Die Abweichungen der erwarteten von der tatsächlichen Nachfrage sollten im Mittel null sein, doch da immer statistische Abweichungen auftreten wird hiermit eine Korrektur durchgeführt.

Die Flexibilisierung verändert Losgrößen. Um wieviel Prozent die Gesamtproduktion erhöht wird, zeigt die Kennzahl:

$$p_j^{\Delta X_{flex}} = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \Delta X_{jts}}{S \cdot \sum_{t=1}^T X_{jt}^{MIP}} \quad (5.9)$$

Die gleiche Kennzahl mit absoluten Losgrößenveränderungen ist folgende:

$$p_j^{\Delta X_{flexAbs}} = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T |\Delta X_{jts}|}{S \cdot \sum_{t=1}^T X_{jt}^{MIP}} \quad (5.10)$$

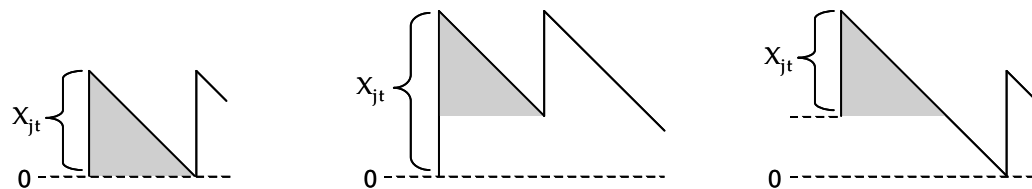
Wieviel Prozent aller Lose eines Produkt durch Flexibilisierung variiert wurden, ergibt sich so:

$$p_j^{\#Xflex} = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \begin{cases} 1 & \forall t = 1, \dots, T \mid \Delta X_{jts} < 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}}{S \cdot \sum_{t=1}^T \begin{cases} 1 & \forall t = 1, \dots, T \mid X_{jt}^{MIP} > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}} \quad (5.11)$$

Eine weitere wichtige Kennzahl für die Erklärung der Wirksamkeit der Flexibilisierung ist der Anteil der Perioden, deren Schlupfkapazität größer als 2 % der Periodenkapazität der Ressource ist:

$$p_m^{Schlupf} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \begin{cases} 1 & \left( Cap_{mt} - \sum_{m \text{ prod } j} X_{jt}^{MIP} \right) > 0,02 \cdot Cap_{mt} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.12)$$

Als weitere Kennzahlen werden in der Auswertung die Lagerkosten des Saison- und des Losgrößenbestands aus dem MIP verwendet. Dazu muss für jede Periode der Lagerbestand  $I_{jt}$  in Saison- und Losgrößenbestand aufgeteilt werden. Es ist einfacher diesen Vorgang grafisch als mathematisch zu erläutern.



**Abbildung 12:** Auf- und Abbau von Saisonbestand

In Abbildung 12 werden drei mögliche Fälle dargestellt. Die horizontale Achse entspricht der Zeit, die vertikale der Lagerbestandshöhe. Falls vor und nach einem Los der Lagerbestand bei null liegt, kann die ganze Losgröße als Losgrößenbestand betrachtet werden, dies ist die graue Fläche im linken Bild. Ist entweder der Bestand vor oder nach dem Los größer null, wird entweder Saisonbestand ab- oder aufgebaut. In der mittleren Abbildung wird Saisonbestand aufgebaut und es darf nur die graue Fläche als Losgrößenbestand betrachtet werden, denn der Rest der Losgröße gehört schon zum neuen Saisonbestand. Im rechten Bild wird Saisonbestand abgebaut, hier darf wieder nur die graue Fläche als Losgrößenbestand gewertet werden.

Sind periodenweise alle Losgrößen- und Saisonalbestände bestimmt, können diese über den Planungszeitraum kumuliert und mit dem entsprechenden Lagerkostensatz multipliziert werden. Die resultierenden Größen werden mit  $C_j^{Saison}$  und  $C_j^{Los}$  bezeichnet.

Wenn in Kapitel 5.2 zur Auswertung kumulierte Werte verwendet werden, bedeutet der weggelassene Index j, dass der Mittelwert über alle Produkte gebildet wurde. Steht anstelle des Index j ein „prim“ bzw. „sec“, bedeutet dies, dass über alle Produkte mit Primär- bzw. Sekundärnachfrage gemittelt wurde.

Für die Untersuchung, ob Kosten signifikant unterschiedlich sind, wird der Vorzeichenrangtest nach Wilcoxon verwendet. Die Berechnung kann der Standardliteratur<sup>67</sup> für Statistik entnommen werden. Es werden immer drei Hypothesen getestet. Erstens wird getestet, ob die Kosten für Sicherheitsbestände zwischen zwei Testfallgruppen gleich sind. Zweitens und drittens wird getestet, ob entweder die einen oder anderen Kosten größer sind. Die Ergebnisse des Vorzeichenrangtests werden im Rahmen der Auswertungen in einer Tabelle wiedergegeben. Die Ablehnung einer Hypothese wird mit „A“ bezeichnet und eine Nicht-Ablehnung mit „NA“.

#### 5.1.4 Durchführung

Der Optimierer und die Simulation werden über Batch-Dateien gestartet. Die Ausgabe erfolgt automatisch in CSV-Dateien<sup>68</sup>, die einfach mit einem Tabellenkalkulationsprogramm ausgewertet werden können.

Die Testinstanzen ohne Flexibilisierung und mit Lost-Sales-Fehlmengenbehandlung werden nach dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Verfahren mit einer Simulationsreihe in sehr kurzer Zeit berechnet. Die Testinstanzen mit starrem Produktionsplänen für den Backorders-Fall werden mit einem hier nicht näher erläuterten Verfahren berechnet, dass alle Sicherheitsbestände am Anfang der Optimierungsreihe auf einen relativ hohen Wert festlegt und dann nacheinander solange absenkt, bis der  $\beta$ -Servicegrad von 98 % erreicht ist.

Für alle Testfälle mit Flexibilisierung muss der Optimierer verwendet werden. Pro Testinstanz werden auf einem PC mit AMD Duron Prozessor mit 800 MHz

---

<sup>67</sup> Vgl. z.B. Hartung (2002), S.243-247.

<sup>68</sup> CSV = Comma Separated Values

etwa 25 Minuten benötigt, um mit Optimierer und Simulation Sicherheitsbestände zu bestimmen. Die Zeit, die für einen Simulationslauf (eine Umweltlage) benötigt wird, beläuft sich bei diesem PC etwa auf eine hundertstel Sekunde.

## 5.2 Auswertung der Ergebnisse

### 5.2.1 Bestimmung ohne Flexibilisierung

Bevor mit der Auswertung der einzelnen Ergebnisgruppen begonnen wird, sollte untersucht werden, wie zuverlässig das Bestimmungsverfahren mit Simulation ist. Dazu werden zehnmal hintereinander Sicherheitsbestände für das Modell G001130<sup>69</sup> mit Lost-Sales und ohne Flexibilisierung mit verschiedenen Zufallsströmen bestimmt. Es werden davon fünf mit einer Anzahl von 100 und die anderen fünf mit 1.600 Simulationsläufen berechnet. 100 Simulationsläufe ist die Anzahl, mit der alle Testinstanzen für die folgenden Auswertungen berechnet wurden.

Zufallsstrom	$C^{Total}$	(+ / -)	# Simulationsläufe	$SS_1$	$SS_2$	$SS_3$	$SS_4$
A	36.372	1.424	100	41,4	28,6	37,3	92,1
B	34.493	1.245	100	44,8	17,7	42,4	81,8
C	38.105	1.457	100	68,6	29,4	41,4	89,9
D	37.207	1.386	100	65,0	31,1	37,2	90,0
E	35.654	1.346	100	52,6	27,8	35,2	81,7
A	35.938	337	1.600	54,3	25,4	38,2	79,7
B	35.907	332	1.600	57,4	24,1	37,8	85,4
C	36.360	354	1.600	56,6	27,2	39,5	80,4
D	35.952	332	1.600	55,1	25,9	38,7	79,8
E	35.973	346	1.600	56,6	26,3	38,6	80,7

**Tabelle 7:** Verschiedene Zufallsströme

Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass bei einer Anzahl von 100 Simulationsläufen die Gesamtkosten stark schwanken - auch über das Konfidenzintervall „(+/-)“ hinaus. Die bestimmten Sicherheitsbestände sind ebenfalls deutlich verschieden. Bei einer Anzahl von 1.600

<sup>69</sup> Generelle Produktionsstruktur, leichte Variation der Nachfrage, Auslastung aller Ressourcen 90 %, Zeit zwischen Losauflagen: vier, kein saisonaler Nachfrageverlauf.

Simulationsläufen erweisen sich die Ergebnisse als wesentlich stabiler. Das Konfidenzintervall verkleinert sich etwa um ein Viertel und die bestimmten Gesamtlagerkosten liegen innerhalb einer wesentlich kleineren Variationsbreite. Die Ergebnisse mit 100 Simulationsläufen hätten für eine Verwendung in der Praxis eine zu geringe Genauigkeit, sind aber für die folgenden Untersuchungen ausreichend.

Es werden nun nacheinander verschiedene Parameter untersucht und die sich damit ergebenden Untergruppen gegenübergestellt.

Die Lagerkosten für Sicherheitsbestände sind das wichtigste Kriterium bei der Auswertung. In dieser Kennzahl drücken sich die Kosten aus, die unter Einfluss von Unsicherheit zusätzlich aufgebracht werden müssen, um einen bestimmten gewünschten Servicegrad (98 %) zu erreichen.

Alle Werte in den Auswertungstabellen der nächsten Abschnitte sind gemittelte Werte der jeweiligen Kennzahlen über alle Testinstanzen einer untersuchten Untergruppe.

### *Lost-Sales- und Backorders-Fall*

Bei der Bestimmung ohne Flexibilisierung werden 192 Fälle ohne Vorlaufzeit und 32 mit einer Vorlaufzeit von einer Periode untersucht. Bei der Auswertung von Parametergruppen wird die Fehlmengenbehandlung für den Lost-Sales-Fall und den Backorders-Fall immer getrennt untersucht, weil - wie sich zeigen wird - die Wirkungszusammenhänge deutlich verschieden sind. Eine gemeinsame Auswertung würde zu große Heterogenität innerhalb der Gruppen bedeuten. Der Lost-Sales-Fall wird im weiteren Verlauf mit der Buchstabenkombination „LS“ und der Backorders-Fall mit „BO“ bezeichnet.

Folgende Tabelle 8 stellt die Ergebnisse von 96 Lost Sales- und 96 Backorders-Fällen ohne Vorlaufzeiten gegenüber:

Gruppe	$C^{Total}$	(+/-)	$C^{SB}$	$C^{Rest}_{prim}$	$C^{Saison}_{prim}$	$C^{Los}_{prim}$	$P^I_{prim}$	$P^X_{prim}$
LS	45.918	1.693	13.825	13.117	5.041	5.180	38,7 %	79,1 %
BO	52.871	2.181	18.009	15.886				

**Tabelle 8:** Ergebnisse – Lost Sales und Backorders – starre Produktion

Die vier rechten Spalten sind Kennzahlen aus dem MIP. Sie sind bei Lost-Sales und Backorders identisch, weil beide auf den gleichen Produktionsplänen

basieren. Sie haben für diese Tabelle keine direkte Aussagekraft, geben aber als Mittel über alle Testfälle eine Grundlage für die folgenden Auswertungen der Untergruppen.

Hypothese	$C^{SB-LS} = C^{SB-BO}$	$C^{SB-LS} \geq C^{SB-BO}$	$C^{SB-LS} \leq C^{SB-BO}$
Abgelehnt/nicht abgelehnt	A	A	NA

**Tabelle 9:** Vorzeichenrangtest – Lost-Sales und Backorders

Die Sicherheitsbestandskosten sind bei Lost-Sales deutlich geringer. Der Vorzeichenrangtest aus Tabelle 9 unterstützt diese Beobachtung. Durch welche Zusammenhänge dieses Ergebnis zustande kommt, konnte noch nicht untersucht werden.

Auffallend ist, dass bei Lost-Sales das mittlere Konfidenzintervall für die Gesamtlagerkosten wesentlich niedriger ist. Backorders haben anscheinend eine destabilisierende Wirkung, die in stärker schwankenden Kosten resultiert.

### *Generelle und konvergierende Struktur*

Die Tabelle 10 zeigt die gegenübergestellten Ergebnisse für die generellen und konvergierenden Strukturen. Die generellen Strukturen werden im weiteren Verlauf mit dem Buchstaben G und die konvergierenden mit K bezeichnet. Die rechten vier Spalten der MIP-Ergebnisse wiederholen sich nach zwei Zeilen, um eine direkte Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

Gruppe	$C^{Total}$	(+ / -)	$C^{SB}$	$C^{Rest}_{prim}$	$C^{Saison}_{prim}$	$C^{Los}_{prim}$	$P^I_{prim}$	$P^X_{prim}$
G-LS	46.792	1.404	15.653	17.571	4.792	9.456	0,447	0,649
K-LS	45.044	1.983	11.998	8.663	5.289	903	0,327	0,932
G-BO	56.612	1.815	22.557	20.487	4.792	9.456	0,447	0,649
K-BO	49.130	2.548	13.462	11.285	5.289	903	0,327	0,932

**Tabelle 10:** Ergebnisse – Generelle und konv. Struktur – starre Produktion

Die generellen Strukturen weisen wesentlich höhere Sicherheitsbestandslagerkosten auf. Ein Vorzeichenrangtest ist nicht nötig da alle Werte paarweise höher sind. Die höheren Kosten sind erklärbar mit einer um 150 % höheren Gesamtnachfrage, die durch die Parameter der Testfälle so festgelegt ist. Vor diesem Hintergrund müssten die Sicherheitsbestandskosten noch wesentlich höher sein, aber bei den konvergierenden Strukturen wird deutlich öfter ge-

rüstet, was man an der Kennzahl  $p_{prim}^x$  sieht. Dies kommt durch höhere Lagerkostensätze zustande. Durch das häufige Rüsten entsteht weniger Lösgrößenbestand (siehe Spalte  $C_{prim}^{Los}$ ) und damit nimmt die Pufferfunktion diese Bestandsart ab. Deshalb müssen bei den konvergierenden Strukturen trotz der niedrigeren Nachfrage doch relativ große Sicherheitsbestände gehalten werden.

Wie sich eben gezeigt hat, sind die generellen und konvergierenden Testfälle in ihrer Rüstfrequenz deutlich unterschiedlich und können deshalb bei den folgenden Auswertungen nicht zusammen betrachtet werden. Da immer gemittelte Kosten betrachtet werden, und die Kostenniveaus ebenfalls deutlich verschieden sind, kommt eine zusammengefasste Betrachtung ebenfalls nicht in Frage. Es wird somit für jede folgende Untergruppe nach Lost-Sales, Backorders, genereller und konvergierender Struktur getrennt, was sich durch die Kürzel „LS-G“, „LS-K“, „BO-G“ und „BO-K“ in den jeweiligen ersten Spalten der nächsten Tabellen ausdrückt.

#### *Variationskoeffizient der Nachfrage*

Die Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse für einen kleinen (V1) und großen (V2) Variationskoeffizient der Nachfrage. Die Kennzeichnung der jeweiligen Gruppe erfolgt durch die jeweils letzte Kennung in der ersten Spalte.

Gruppe	$C^{Total}$	(+/-)	$C^{SB}$	$C_{prim}^{Rest}$	$C_{prim}^{Saison}$	$C_{prim}^{Los}$	$P_{prim}^I$	$P_{prim}^X$
LS-G-V1	46.786	1.394	15.480	17.390	4.534	9.600	44,7%	64,4%
LS-G-V2	46.798	1.414	15.825	17.753	5.050	9.312	44,8%	65,5%
LS-K-V1	44.664	1.975	11.968	8.628	5.186	931	30,9%	93,6%
LS-K-V2	45.424	1.991	12.028	8.698	5.392	876	34,6%	92,9%
BO-G-V1	56.658	1.802	22.450	20.291	4.534	9.600	44,7%	64,4%
BO-G-V2	56.566	1.828	22.664	20.683	5.050	9.312	44,8%	65,5%
BO-K-V1	48.849	2.544	13.485	11.295	5.186	931	30,9%	93,6%
BO-K-V2	49.411	2.552	13.438	11.275	5.392	876	34,6%	92,9%

**Tabelle 11:** Ergebnisse – Variationskoeffizient der Nachfrage – starre Produktion

Die Kosten für Sicherheitsbestände liegen für beide Gruppe in ähnlicher Höhe, wobei die Sicherheitsbestände bei V2 etwas höher als bei V1 liegen. Dies kann durch den Vorzeichenrangtest (Tabelle 12) allerdings nicht bestätigt werden.

Lediglich im Fall LS-G bestätigt der Vorzeichenrangtest eine Tendenz in diese Richtung.

Gruppe/Hypothese	$C^{SB-V2} = C^{SB-V1}$	$C^{SB-V2} \geq C^{SB-V1}$	$C^{SB-V2} \leq C^{SB-V1}$
LS-G	NA	NA	A
LS-K	NA	NA	NA
BO-G	NA	NA	NA
BO-K	NA	NA	NA

**Tabelle 12:** Vorzeichenrangtest – Variationskoeffizient der Nachfrage

Eine Erklärung für teilweise höhere Sicherheitsbestände bei V2 ist leicht gefunden. Die Streuung der Nachfrage ist größer und es wird zur Kompensation ein höherer Sicherheitsbestand benötigt.

### *Auslastungsgrad*

Für den Auslastungsgrad werden vier Fälle unterschieden, U(90/90/90), U(70/70/70), U(90/70/50) und U(50/70/90). Die erste Zahl gibt die Auslastung für die erste, die zweite für die zweite und die dritte Zahl diejenige für die dritte Stufe an.

Gruppe	$C^{Total}$	(+ / -)	$C^{SB}$	$C^{Rest}_{prim}$	$C^{Saison}_{prim}$	$C^{Los}_{prim}$	$P^I_{prim}$	$P^X_{prim}$
LS-G-U(90/90/90)	42.471	1.429	15.407	18.727	8.759	6.660	45,8%	72,1%
LS-G-U(70/70/70)	47.261	1.389	15.884	16.867	1.308	12.311	45,8%	58,2%
LS-G-U(90/70/50)	56.941	1.421	15.675	20.432	8.866	8.693	51,4%	65,1%
LS-G-U(50/70/90)	40.496	1.378	15.645	14.260	236	10.161	35,9%	64,3%
LS-K-U(90/90/90)	38.579	2.084	12.020	11.460	9.887	242	47,2%	97,6%
LS-K-U(70/70/70)	46.487	1.889	12.037	5.813	898	1.379	21,9%	89,2%
LS-K-U(90/70/50)	55.625	2.082	11.946	11.855	10.308	445	52,4%	95,1%
LS-K-U(50/70/90)	39.486	1.876	11.988	5.525	63	1.548	9,4%	91,0%
BO-G-U(90/90/90)	50.783	1.789	20.646	21.801	8.759	6.660	45,8%	72,1%
BO-G-U(70/70/70)	58.163	1.838	24.014	19.638	1.308	12.311	45,8%	58,2%
BO-G-U(90/70/50)	66.360	1.810	22.016	23.509	8.866	8.693	51,4%	65,1%
BO-G-U(50/70/90)	51.143	1.824	23.551	17.002	236	10.161	35,9%	64,3%
BO-K-U(90/90/90)	40.787	2.508	11.325	14.362	9.887	242	47,2%	97,6%
BO-K-U(70/70/70)	51.992	2.568	15.177	8.179	898	1.379	21,9%	89,2%
BO-K-U(90/70/50)	58.615	2.552	11.999	14.793	10.308	445	52,4%	95,1%
BO-K-U(50/70/90)	45.126	2.563	15.346	7.807	63	1.548	9,4%	91,0%

**Tabelle 13:** Ergebnisse – Auslastungsgrad – starre Produktion

Für Backorders benötigt  $U(90/90/90)$  niedrigere Sicherheitsbestände als  $U(70/70/70)$ , was durch wesentlich höheren saisonalen Bestand bzw. deren Kosten  $C_{prim}^{Saison}$  begründet werden kann (siehe Tabelle 13). Im Gegenzug sinken zwar die Kosten für Losbestände  $C_{prim}^{Los}$ , doch saisonaler Bestand kann wirkungsvoller Sicherheitsbestand ersetzen, weil er üblicherweise länger andauert und zusätzlich die kritischen Zeitpunkte in Losperioden abdeckt. Ohne saisonalen Bestand ist in Perioden mit Losauflage kurz vor Zugang der Produkte aus dem neuen Los der Lagerbestand sehr niedrig, was bei unerwartet hoher Nachfrage leicht zu Fehlmengen führen kann.

Da die Auslastung von Vorstufen bei starren Produktionsplänen keine Auswirkung auf Sicherheitsbestände der Endprodukte hat, ähneln sich jeweils die Ergebnisse für  $U(90/90/90)$ - $U(90/70/50)$  und  $U(70/70/70)$ - $U(50/70/90)$  stark.

Der Vorzeichenrangtest wurde wegen der großen Anzahl der erforderlichen Vergleiche hier nicht durchgeführt.

Die genannten Wirkungen gelten anscheinend für Lost-Sales nicht oder nur kaum. Die Sicherheitsbestandskosten der Lost-Sales-Fälle liegen alle jeweils in der gleichen Größenordnung, was den Schluss nahe legt, dass saisonaler Bestand mit Lost-Sales weniger effektiv Sicherheitsbestände ersetzen kann als mit Backorders.

### *Zeit zwischen Losauflagen*

Die beiden untersuchten Gruppen sind  $T(4,4,4)$  und  $T(2,4,6)$ . In der ersten liegt die Zeit zwischen zwei Losauflagen (TBO) auf jeder Stufe bei vier Perioden, in der zweiten Gruppe von Stufe zu Stufe von zwei bis sechs zunehmend. Da hier nur starre Produktionspläne mit Primärnachfrage ausschließlich auf der erste Stufe untersucht werden, ist besonders die erste Zahl maßgeblich.

Tabelle 14 und der Vorzeichenrangtest (Tabelle 15) bestätigen, dass die Sicherheitsbestandskosten von  $T(4,4,4)$  höher als die von  $T(2,4,6)$  sind. Eigentlich müssten die Verhältnisse umgekehrt sein, denn die Kennzahl  $p_{prim}^x$  ist zumindest bei generellen Strukturen für  $T(4,4,4)$  niedriger, was weniger kritische Perioden mit niedrigem Lagerbestand bedeutet, ebenso ist  $p_{prim}^l$  deutlich höher, was auf mehr Saison- und Losgrößenbestand zum Ersetzen von Sicherheitsbestand hindeutet.

Gruppe	$C^{Total}$	(+/-)	$C^{SB}$	$C^{Rest}_{prim}$	$C^{Saison}_{prim}$	$C^{Los}_{prim}$	$p^I_{prim}$	$p^X_{prim}$
LS-G-T(4,4,4)	46.833	1.408	15.811	19.379	4.967	11.543	50,9%	59,4%
LS-G-T(2,4,6)	46.751	1.401	15.494	15.764	4.617	7.369	38,5%	70,4%
LS-K-T(4,4,4)	42.256	1.984	12.038	8.950	5.446	1.176	35,8%	91,3%
LS-K-T(2,4,6)	47.832	1.981	11.958	8.376	5.132	630	29,7%	95,1%
BO-G-T(4,4,4)	57.208	1.832	23.265	22.300	4.967	11.543	50,9%	59,4%
BO-G-T(2,4,6)	56.017	1.798	21.849	18.674	4.617	7.369	38,5%	70,4%
BO-K-T(4,4,4)	46.732	2.572	13.880	11.583	5.446	1.176	35,8%	91,3%
BO-K-T(2,4,6)	51.529	2.523	13.043	10.987	5.132	630	29,7%	95,1%

**Tabelle 14:** Ergebnisse – Zeit zwischen Losauflagen – starre Produktion

Gruppe/Hypothese	$C^{SB-T(4,4,4)} = C^{SB-T(2,4,6)}$	$C^{SB-T(4,4,4)} \geq C^{SB-T(2,4,6)}$	$C^{SB-T(4,4,4)} \leq C^{SB-T(2,4,6)}$
LS-G	A	NA	A
LS-K	NA	NA	NA
BO-G	A	NA	A
BO-K	A	NA	A

**Tabelle 15:** Vorzeichenrangtest – Zeit zwischen Losauflagen

Anscheinend gibt es einen anderen Einfluss, der stärker als die beiden genannten ist. Wenn man eine Losreichweite als Risikozeitraum betrachtet und diese bei T(4,4,4) im Mittel größer ist, benötigt man, um einen größeren Risikozeitraum abzusichern, mehr Sicherheitsbestand.<sup>70</sup> Damit wären die Ergebnisse erklärbar. Allerdings ist fraglich, ob die starren Loszyklen als unabhängige Risikozeiträume betrachtet werden können oder ob nicht vielmehr der gesamte Planungszeitraum als ein unteilbarer Risikozeitraum betrachtet werden muss.

### *Saisonaler Nachfrageverlauf*

Es werden Fälle ohne saisonalen Nachfrageverlauf (S0), mit leichtem (S1) und mit starkem (S2) saisonalem Verlauf untersucht.

Betrachtet man die Kennzahlen aus Tabelle 16, so sollten nach bisherigem Interpretationsmuster die Fälle mit höherem saisonalem Bestand höhere Sicherheitsbestandskosten aufweisen. Denn  $p^X_{prim}$  ist niedriger,  $p^I_{prim}$  ist höher

<sup>70</sup> Vgl. Tempelmeier (1999), S. 364, 376-378.

und der Saisonbestand bzw. deren Kosten  $C_{prim}^{Saison}$  sind wesentlich höher, was ebenfalls auf niedrigere Sicherheitsbestände schließen lässt.

Gruppe	$C^{Total}$	(+/-)	$C^{SB}$	$C_{prim}^{Rest}$	$C_{prim}^{Saison}$	$C_{prim}^{Los}$	$P_{prim}^I$	$P_{prim}^X$
LS-G-S0	42.852	1.403	15.666	13.877	1.147	8.895	37,9%	69,0%
LS-G-S1	46.863	1.398	15.806	16.816	3.536	10.003	45,8%	63,2%
LS-G-S2	50.662	1.411	15.486	22.021	9.694	9.471	50,5%	62,6%
LS-K-S0	40.094	1.879	11.757	4.917	489	395	10,4%	97,9%
LS-K-S1	46.202	2.019	11.947	8.632	5.694	886	41,2%	93,7%
LS-K-S2	48.837	2.050	12.289	12.440	9.685	1.430	46,6%	88,0%
BO-G-S0	53.783	1.857	23.757	16.717	1.147	8.895	37,9%	69,0%
BO-G-S1	57.045	1.819	23.096	19.708	3.536	10.003	45,8%	63,2%
BO-G-S2	59.009	1.769	20.818	25.037	9.694	9.471	50,5%	62,6%
BO-K-S0	44.313	2.490	13.573	7.320	489	395	10,4%	97,9%
BO-K-S1	50.243	2.579	13.275	11.346	5.694	886	41,2%	93,7%
BO-K-S2	52.834	2.575	13.537	15.190	9.685	1.430	46,6%	88,0%

**Tabelle 16:** Ergebnisse – Saisonaler Nachfrageverlauf – starre Produktion

Betrachtet man die Sicherheitsbestandskosten und die Ergebnisse des Vorzeichenrangtests (Tabelle 17 und Tabelle 18), so zeigen ausschließlich die Fälle mit BO-G die erwarteten Resultate. Im Gegensatz dazu steigen die Sicherheitsbestandskosten für die Fälle LS-K sogar bei größeren saisonalen Schwankungen an.

Es ist demnach ein weiterer Einflussfaktor wichtig. Wie im vorherigen Abschnitt, könnte der Abstand zwischen zwei Losen wieder als Risikozeitraum angesehen werden. Mit stärkerem saisonalen Verlauf nimmt die Losfrequenz ab (siehe  $p_{prim}^X$ ), und damit wäre ein größerer Sicherheitsbestand nötig.

Gruppe/Hypothese	$C^{SB-S0} = C^{SB-S1}$	$C^{SB-S0} \geq C^{SB-S1}$	$C^{SB-S0} \leq C^{SB-S1}$
LS-G	NA	NA	NA
LS-K	NA	A	NA
BO-G	NA	NA	A
BO-K	NA	NA	NA

**Tabelle 17:** Vorzeichenrangtest – Saisonaler Nachfrageverlauf S0/S1

Gruppe/Hypothese	$C^{SB-S0} = C^{SB-S2}$	$C^{SB-S0} \geq C^{SB-S2}$	$C^{SB-S0} \leq C^{SB-S2}$
LS-G	NA	NA	NA
LS-K	A	A	NA
BO-G	A	NA	A
BO-K	NA	NA	NA

**Tabelle 18** Vorzeichenrangtest – Saisonaler Nachfrageverlauf S0/S2

### *Vorlaufzeit*

Die Kosten  $C^{SB}$  aus Tabelle 19 zeigen keine deutlichen Unterschiede zwischen den Fällen ohne (V0) und mit (V1) Vorlaufzeit. Dies unterstützen auch die hier nicht abgebildeten Ergebnisse des Vorzeichenrangtests, denn alle Hypothesen werden abgelehnt. Es ist einleuchtend, denn die Vorlaufzeit beeinflusst weder die Nachfrage, die Losabstände noch die Losgrößen. Die Vorlaufzeit wirkt sich nur in der um eine Periode verschobenen Produktion von Vorprodukten aus, hat aber bei einem starren Produktionsplan keinen Einfluss auf Sicherheitsbestände.

Gruppe	$C^{Total}$	(+ / -)	$C^{SB}$	$C^{Rest}_{prim}$	$C^{Saison}_{prim}$	$C^{Los}_{prim}$	$p^I_{prim}$	$p^X_{prim}$
LS-G-V0	43.383	1.398	15.542	15.570	2.322	9.789	42,8%	66,0%
LS-G-V1	56.282	1.402	15.705	16.775	3.326	10.224	45,7%	63,1%
LS-K-V0	40.236	1.951	11.856	6.460	2.918	489	24,0%	96,4%
LS-K-V1	58.322	1.958	12.014	7.269	3.738	882	32,8%	93,2%
BO-G-V0	53.654	1.823	22.935	18.448	2.322	9.789	42,8%	66,0%
BO-G-V1	66.300	1.824	22.830	19.668	3.326	10.224	45,7%	63,1%
BO-K-V0	44.011	2.513	13.010	9.081	2.918	489	24,0%	96,4%
BO-K-V1	62.514	2.543	13.531	9.944	3.738	882	32,8%	93,2%

**Tabelle 19:** Ergebnisse – Vorlaufzeit – starre Produktion

### **5.2.2 Bestimmung mit Flexibilisierung**

Die Ergebnisse für den Kostenvergleich zwischen den Testfällen ohne und mit Flexibilisierung werden in Tabelle 20 gezeigt. Es handelt sich um jeweils 96 Testinstanzen ohne Vorlaufzeiten mit generellen Produktionsstrukturen. Konvergierende Strukturen lieferten mit Flexibilisierung keine zufriedenstellenden

Ergebnisse (siehe nächster Abschnitt) und werden aus den folgenden Auswertungen ausgeschlossen.

Testinstanzen	$C^{Total}$	(+/-)	$C^{SB}$	$C^{Rest}$
ohne Flexibilisierung	51.702	1.610	19.105	32.597
mit Flexibilisierung	49.651	1.494	15.335	34.316

**Tabelle 20:** Ergebnisse – ohne/mit Flexibilisierung

Die Gesamtlagerkosten werden deutlich gesenkt. Ein Vorzeichenrangtest ist nicht erforderlich, bei 93,8 % der Testfälle ist das Ergebnis mit Flexibilisierung besser. Es können nun nicht mehr nur die Sicherheitsbestandslagerkosten  $C^{SB}$  betrachtet werden, denn die restlichen Lagerkosten  $C^{Rest}$  werden durch Flexibilisierung ebenfalls beeinflusst. Dies lässt sich zum einem damit erklären, dass als Puffer verwendete Saisonbestände durch Losvergrößerung wieder aufgefüllt werden, zum anderen liegt dies an der Berechnungsweise der einzelnen Periodensicherheitsbestände. Dadurch, dass nur der Lagerendbestand einer Periode bis zum ersten Sicherheitsbestandsniveau als Sicherheitsbestand gewertet wird, fallen Sicherheitsbestände zwischen der ersten Sicherheitsbestandshöhe und der Auffüllhöhe (zweiter Sicherheitsbestand) aus den Sicherheitsbestandslagerkosten  $C^{SB}$  heraus. Die Begründung für diese Berechnungsweise und die Berechnungsformel wird in Kapitel 5.1.3 angegeben. Für die weiteren Ergebnisse werden hauptsächlich die Gesamtlagerkosten  $C^{Total}$  untersucht und verglichen.

Das Konfidenzintervall für die Gesamtkosten liegt mit Flexibilisierung in ähnlichen Größenordnungen und sinkt sogar im Mittel.

Die Ergebnisse mit Flexibilisierung haben im Mittel 4 % niedrigere Gesamtlagerkosten als ohne Flexibilisierung ( $p^{flex-starr}$ , siehe Kapitel 5.1.3). Das Verhältnis der Lagerkosten von Vor- zu Endproduktsicherheitsbeständen liegt bei 0,257. Es wurden im Mittel 142.986 Simulationsläufe benötigt, um mit dem genetischen Algorithmus die Sicherheitsbestände zu bestimmen. Darin enthalten sind auch diejenigen Simulationsläufe für Individuen, deren Ergebnisgenauigkeit reduziert wurde und deren Anzahl von Simulationsläufen damit oft weit unterhalb von 100 lag.

Der  $\beta$ -Servicegrad liegt immer über dem Minimum von 98 % und beläuft sich im Mittel auf 98,012 %.

In Kapitel 4.2.3.1 wurde diskutiert, dass das „Verbrauchen“ der Sicherheitsbestände verhindert werden muss. Alle Sicherheitsbestände der untersuchten Fälle liegen im Mittel über ihrem Anfangsniveau. Die Bestände der Endprodukte liegen im Mittel am Ende eines Planungszeitraums 47,7 % über dem vorgegebenen ersten Sicherheitsbestand, die direkten Vorprodukte der Endprodukte (Zwischenprodukte) 1,2 % und deren Vorprodukte bei 38,2 % (zur Berechnung dieser Kennzahl  $p^{SB-Übrig}$  siehe Kapitel 5.1.3). Hier wird sichtbar, dass die verwendete Heuristik zur Flexibilisierung nicht optimal ist, denn es wird zu viel an zweitem Sicherheitsbestand aufgebaut, der nicht verwendet bzw. nicht wieder abgebaut wird. Es entstehen dadurch unnötige Lagerkosten und die Gesamtproduktionsmenge ist zu hoch.

Für Endprodukte werden im Mittel 42,0 % aller Lose in ihrer Höhe durch Flexibilisierung variiert, für Vorprodukte sind es ebenfalls 42,0 % ( $p^{\#Xflex}$ ). Dies ist eine relativ hohe Zahl und es ist fraglich, ob ein solcher Wert in der Praxis umsetzbar wäre.

Die Produktionsmenge eines Planungszeitraums wird im Mittel für Endprodukte um 0,8 % und für Vorprodukte um ebenfalls 0,8 % angehoben ( $p^{\Delta Xflex}$ ). Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass die Lösungen nicht optimal sind, denn es sollte nur soviel produziert werden, wie auch nachgefragt wird.

Die mittlere, absolute Veränderung der Losgrößen liegt für Endprodukte bei 3,3 % und bei Vorprodukten bei 1,2 % ( $p^{\Delta XflexAbs}$ ).

### ***Konvergierende Struktur***

Bei der Bestimmung mit Flexibilisierung hat sich für die Testfälle mit konvergierender Struktur kein besseres Ergebnis eingestellt, der Optimierer findet nur Ergebnisse mit Sicherheitsbeständen für Endprodukte, alle anderen Sicherheitsbestände sind null. Damit ergeben sich die gleichen Ergebnisse wie für die Testinstanzen mit starrem Produktionsplan. Es entfällt damit die Präsentation dieser Ergebnisse.

Um diesen Problem auf den Grund zu gehen, wurden zum Test die Lagerkostensätze des Endprodukts verdreifacht und unter diesen neuen Rahmenbedingungen erneut Sicherheitsbestände mit Flexibilisierung bestimmt. Im Ergebnis sind bei fast allen Testfällen die Sicherheitsbestände der Vorprodukte

---

größer als null. Das Problem drückt sich demnach durch das Verhältnis der Lagerkostensätze von End- zu Vorprodukten aus.

Stellt sich nun die Frage, warum bei generellen Strukturen die Flexibilisierung gute Ergebnisse liefert und bei konvergierenden nicht. Dazu muss man sich verdeutlichen, welche Konsequenzen die Flexibilisierung der Endproduktlose für Vorprodukte hat. Nachfrage, die niedriger als erwartet auftritt, resultiert in Übermengenbestand, der durch Flexibilisierung zur Verminderung von Lagerkosten abgebaut werden soll. Findet eine Losverkleinerung für ein Endprodukt statt, sind nun auch unbenutzte Vorprodukte übrig. Diese sollen nun möglichst schnell durch eine Verkleinerung der Vorproduktlose reduziert werden. Würde man diese Vorproduktbestände nicht reduzieren, würden zusätzliche Lagerkosten verursacht werden und damit die Lagerkostensparnis an Endprodukten schnell kompensiert werden.

Die Reduktion der Übermengenbestände der Vorprodukte kann allerdings nur bei einem Los erfolgen. Da die Losperioden von Endprodukten und Vorprodukten nicht identisch sein müssen, kann eine Verzögerung entstehen. Während dieser Verzögerung verursachen die Vorprodukte Lagerkosten. Je mehr verschiedene Vorprodukte ein Endprodukt benötigt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Wartezeiten vor der Reduzierung der Vorproduktbestände entstehen und desto größer ist auch die Gefahr, dass durch diese Wartezeiten die Einsparung der Endproduktlagerkosten durch zusätzliche Vorproduktlagerkosten kompensiert werden.

Da bei der generellen Struktur ein oder zwei verschiedene Vorprodukte und bei der konvergierenden Struktur drei verschiedene Vorprodukte zur Produktion der Endprodukte benötigt werden (siehe Produktionsstruktur Kapitel 5.1.1), ist der eben genannte Effekt bei konvergierenden Strukturen größer. Sind die gegebenen Lagerkostensätze der Endprodukte relativ hoch (wie bei obiger Verdreifachung der Lagerkostensätze), so ist die Ersparnis an Lagerkosten bei Endproduktion so groß, dass diese durch den genannten Effekt nicht mehr aufgehoben werden kann.

### *Lost-Sales- und Backorders-Fall*

Für Tabellen in den folgenden Auswertungen werden die gleichen Kennzeichnungen der Testfallgruppen in der jeweils ersten Spalte gewählt, wie sie im letzten Kapitel eingeführt und verwendet wurden.

Es werden für die restlichen Auswertungen keine Vorzeichenrangtests benötigt, da die Ergebnisse in den meisten Fällen (paarweise) deutlich verschieden sind.

Wie bei den Ergebnissen für starre Produktionspläne zeigen sich mit Flexibilisierung ebenso große Unterschiede zwischen dem Lost-Sales- und dem Backorders-Fall. Die Flexibilisierung bewirkt bei Backorders im Mittel 5,5 % niedrigere Sicherheitsbestandskosten und damit bessere Ergebnisse als bei Lost-Sales mit 2,6 % (Tabelle 21). Die mittlere, absolute Veränderung der Losgrößen ist demnach auch wesentlich höher ( $p^{\Delta XflexAbs}$ ). Bei Backorders werden mehr Vorproduktsicherheitsbestände verwendet, was sich durch ein Verhältnis von 0,362 im Vergleich zu 0,153 der Lagerkosten von Vor- zu Endproduktsicherheitsbeständen zeigt ( $C_{sek}^{SB} / C_{prim}^{SB}$ ).

Interessant ist, dass bei Lost-Sales mehr Vorproduktlose und bei Backorders mehr Endproduktlose verändert werden und dies etwa in der gleichen Höhe stattfindet ( $p^{\#Xflex}$ ).

Gruppe	$C_{Total}$	$p^{flex-starr}$	$C_{sek}^{SB} / C_{prim}^{SB}$	$C^{SB}$	$C^{Rest}$	$P_{prim}^{\#Xflex}$	$P_{sek}^{\#Xflex}$	$P_{prim}^{\Delta XflexAbs}$	$P_{sek}^{\Delta XflexAbs}$
LS	45.663	2,6%	0,153	13.382	32.281	40,6%	43,9%	2,4%	0,9%
BO	53.638	5,5%	0,362	17.288	36.350	43,4%	40,0%	4,2%	1,4%

**Tabelle 21:** Ergebnisse – Lost Sales und Backorders – flexibilisierte Produktion

### *Auslastungsgrad*

Bei unterschiedlichen Auslastungsprofilen stellen sich deutliche Unterschiede in der Wirksamkeit der Flexibilisierung ein. Die Spanne reicht von 1,2 % bis 4,1 % bei Lost-Sales und 2,4 % bis 8,0 % bei Backorders (siehe Tabelle 22).

Die Verbesserung bei (90/90/90) zu (70/70/70) mit Flexibilisierung resultiert aus der größeren Verfügbarkeit von Schlupfkapazität (siehe Spalte  $p_m^{Schlupf}$ ). Gegenläufig ist allerdings die Anzahl der Produktionsperioden. Je höher die Losfrequenz, desto schneller und wirkungsvoller kann die Flexibilisierung auf Nachfrageschwankungen reagieren. Die Losfrequenz bzw. der Anteil der Pro-

duktionsperioden (siehe  $p^x$  in Tabelle) ist bei (70/70/70) wesentlich niedriger. Anscheinend ist der erstgenannte Faktor wichtiger und dominiert das Ergebnis.

Gruppe	$p^{flex-starr}$	$p_{prim}^x$	$p_{sek}^x$	$C_{prim}^{Saison}$	$C_{sek}^{Saison}$	$C_{prim}^{Los}$	$C_{sek}^{Los}$	$p_1^{Schlupf}$	$p_2^{Schlupf}$	$p_3^{Schlupf}$
LS-U(90/90/90)	2,4%	72,1%	62,6%	8.759	3.437	6.660	4.899	37,5%	34,7%	23,3%
LS-U(70/70/70)	2,8%	58,2%	41,4%	1.308	2.885	12.311	11.626	75,0%	65,3%	37,2%
LS-U(90/70/50)	1,2%	65,1%	36,6%	8.866	1.846	8.693	18.989	34,4%	68,0%	41,3%
LS-U(50/70/90)	4,1%	64,3%	55,0%	236	3.818	10.161	6.773	97,2%	78,8%	19,1%
BO-U(90/90/90)	4,4%	72,1%	62,6%	8.759	3.437	6.660	4.899	37,5%	34,7%	23,3%
BO-U(70/70/70)	7,2%	58,2%	41,4%	1.308	2.885	12.311	11.626	75,0%	65,3%	37,2%
BO-U(90/70/50)	2,4%	65,1%	36,6%	8.866	1.846	8.693	18.989	34,4%	68,0%	41,3%
BO-U(50/70/90)	8,0%	64,3%	55,0%	236	3.818	10.161	6.773	97,2%	78,8%	19,1%

**Tabelle 22:** Ergebnisse – Auslastungsgrad – flexibilisierte Produktion

Das schlechte Abschneiden der Fälle mit (90/70/50) hat zum einen damit zu tun, dass bei den Endprodukten wenig Schlupfkapazität frei ist. Im Vergleich zu (90/90/90) stellt sich zusätzlich noch ein weiterer negativer Effekt ein. Denn bei (90/70/50) werden fast nur noch halb so viel Lose der Vorprodukte aufgelegt ( $p_{sek}^x$ ) wie bei (90/90/90). Dies behindert die schnelle Reaktion der Vorproduktflexibilisierung auf Losgrößenänderungen der Endprodukte. Es macht sich hier der gleiche Effekt bemerkbar, der schon im Abschnitt über konvergierende Strukturen erläutert wurde.

Bei (50/70/90) liegen die günstigsten Bedingungen für Schlupfproduktion vor. Hier ist der Anteil der Perioden mit Schlupfkapazität bei Endprodukten sehr hoch und zusätzlich ist die Anzahl der Losperioden der Vorprodukte relativ hoch, so dass der Effekt, der für konvergierende Strukturen diagnostiziert wurde, hier gering ausfällt. Dies ist anscheinend die optimale Kombination von Rahmenbedingungen für die verwendete Flexibilisierungsheuristik.

### *Zeit zwischen Losauflagen*

Bei Veränderung des Parameters TBO von (4,4,4) auf (2,4,6) verbessert sich die Leistungsfähigkeit der Flexibilisierung (siehe Tabelle 23). Dies ist zum einen auf den größeren Anteil von Schlupfperioden auf Ressource eins und zwei zurückzuführen, zum anderen macht sich die TBO von sechs bei Produkten der Ressource drei kaum bei der Losfrequenz bemerkbar, denn die Anzahl der

Lose bleibt im Mittel über die Produkte von Ressource zwei und drei gleich ( $p_{sek}^X \approx 49\%$ ). Das bessere Funktionieren der Flexibilisierung lässt sich ebenfalls an dem Verhältnis von End- zu Vorproduktsicherheitsbestandskosten ablesen.

Gruppe	$p^{flex-starr}$	$C_{sek}^{SB} / C_{prim}^{SB}$	$P_{prim}^X$	$P_{sek}^X$	$p_1^{Schlupf}$	$p_2^{Schlupf}$	$p_3^{Schlupf}$
LS-T(4,4,4)	2,1%	0,128	59,4%	48,6%	57,3%	59,7%	31,4%
LS-T(2,4,6)	3,1%	0,177	70,4%	49,2%	64,8%	63,7%	29,0%
BO-T(4,4,4)	4,6%	0,299	59,4%	48,6%	57,3%	59,7%	31,4%
BO-T(2,4,6)	6,4%	0,425	70,4%	49,2%	64,8%	63,7%	29,0%

**Tabelle 23:** Ergebnisse – Zeit zwischen Losauflagen – flexibilisierte Produktion

### *Saisonaler Nachfrageverlauf*

Bei *starkem* saisonalem Nachfrageeinfluss nimmt die Effektivität der Flexibilisierung stark ab (siehe Tabelle 24), denn während saisonaler Bestand auf- und abgebaut wird, ist die Kapazitätsauslastung hoch und damit wenig Schlupfkapazität verfügbar um Flexibilisierung zu unterstützen. Bei gleich bleibender mittlerer Gesamtauslastung ist dann zwar in den Zeitabschnitten ohne Auf- und Abbau von saisonalem Bestand die Schlupfkapazität größer als ohne saisonalen Verlauf, aber Flexibilisierung profitiert von möglichst konstanten Schlupfkapazitäten, denn somit kann zu jeder Zeit schnell auf Nachfrageschwankungen reagiert werden.

Gruppe	$p^{flex-starr}$	$C_{prim}^{Saison}$	$C_{sek}^{Saison}$	$C_{prim}^{Los}$	$C_{sek}^{Los}$	$p_1^{Schlupf}$	$p_2^{Schlupf}$	$p_3^{Schlupf}$
LS-S0	3,1%	1.147	2.097	8.895	11.212	68,5%	66,9%	31,2%
LS-S1	2,9%	3.536	3.064	10.003	11.177	64,1%	64,8%	34,1%
LS-S2	1,8%	9.694	3.827	9.471	9.327	50,5%	53,4%	25,3%
BO-S0	6,3%	1.147	2.097	8.895	11.212	68,5%	66,9%	31,2%
BO-S1	6,4%	3.536	3.064	10.003	11.177	64,1%	64,8%	34,1%
BO-S2	3,7%	9.694	3.827	9.471	9.327	50,5%	53,4%	25,3%

**Tabelle 24:** Ergebnisse – Saisonaler Nachfrageverlauf – flexibilisierte Produktion

Bei dem Vergleich der Fälle *ohne* saisonalen Verlauf mit denjenigen mit *leichtem* saisonalen Verlauf gleichen sich zwei Effekte aus. Zum einen der oben genannt Effekt der Ungleichmäßigkeit der Schlupfkapazitäten, der die Flexibilisierung behindert, zum anderen profitiert die Flexibilisierung bei etwas höherem

saisonalen Verlauf von den größeren Schlupfkapazitäten am Anfang des Planungszeitraum, denn dadurch können der Sicherheitsbestand schneller auf das zweite Sicherheitsbestandsniveau (Auffüllhöhe) angehoben werden.

### *Vorlaufzeit*

Für die Untersuchung der Wirkungszusammenhänge der Fälle ohne und mit Vorlaufzeiten stehen nur jeweils acht Fälle mit Lost-Sales und acht mit Backorders zur Verfügung.

Gruppe	$p^{flex-starr}$	$C_{sek}^{SB} / C_{prim}^{SB}$	$p_{prim}^x$	$p_{sek}^x$	$p_1^{Schlupf}$	$p_2^{Schlupf}$	$p_3^{Schlupf}$
LS-V0	3,12%	0,171	66,0%	50,7%	63,0%	55,7%	30,7%
LS-V1	1,30%	0,140	63,1%	41,2%	59,9%	50,5%	41,2%
BO-V0	6,52%	0,341	66,0%	50,7%	63,0%	55,7%	30,7%
BO-V1	2,26%	0,209	63,1%	41,2%	59,9%	50,5%	41,2%

**Tabelle 25:** Ergebnisse – Vorlaufzeit – flexibilisierte Produktion

Wie erwartet, erweist sich die Flexibilisierung mit Vorlaufzeiten weniger effektiv (siehe Tabelle 25), denn Vorprodukte können nur mit einer Verzögerungszeit auf die Losgrößenanpassung der jeweils nachfolgenden Produkte reagieren. Verstärkt wird dies im vorliegenden Fall noch durch seltenere Losauflagen (Kennzahl  $p_{prim}^x$ ), was womöglich mit einer nicht optimalen Erstellung der Produktionspläne unter Vorlaufzeiten zu tun hat.

### **5.2.3 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse**

Die mit einer Anzahl von 100 Simulationsläufen erzielte Genauigkeit ist für den Zweck dieser Untersuchung ausreichend, müsste aber für eine Anwendung in der Praxis erhöht werden.

Ohne und mit Flexibilisierung ergeben sich für Lost-Sales deutlich niedrigere Sicherheitsbestandskosten als für Backorders.

Bei höherer Auslastung werden für den Backorders-Fall mit starren Produktionsplänen wesentlich weniger Sicherheitsbestandskosten benötigt, um den  $\beta$ -Servicegrad von 98 % zu erzielen. Da durch höhere Auslastung wesentlich höhere saisonale Bestände aufgebaut werden, liegt der Schluss nah, dass saisonaler Bestand Sicherheitsbestände in ihrer Pufferwirkung unterstützt bzw. ersetzt.

Ist die Zeit zwischen Losauflagen (TBO) kürzer, werden mit starren Produktionsplänen weniger Sicherheitsbestandskosten benötigt. Dies hat anscheinend mit den kürzeren Losreichweiten zu tun, die als kürzerer Risikozeitraum weniger Sicherheitsbestand benötigen.

Mit Flexibilisierung können für die Backorders-Fälle im Vergleich zu Lost-Sales größere Kostensenkungen erreicht werden.

Betrachtet man die verschiedenen Gruppen von Auslastungsprofilen, ergeben sich für diejenigen mit niedrigerer Auslastung und damit mehr Schlupfkapazität bessere Flexibilisierungsergebnisse. Da aber eine niedrige Rüstfrequenz der Vorprodukte negative Auswirkungen zeigt, haben die Testfälle mit niedriger Auslastung für Endprodukte und hoher Auslastung (hohe Rüstfrequenz) für Vorprodukte die besten Kostenersparnisse mit Flexibilisierung ergeben.

Untersucht man den Einfluss von saisonalem Nachfrageverlauf auf die Flexibilisierungsergebnisse, zeigt sich, dass mit starkem saisonalen Verlauf die Effektivität deutlich nachlässt. In diesem Fall steht der Flexibilisierung zwar im Mittel nicht weniger Schlupfkapazität zur Verfügung, doch sie ist sehr ungleichmäßig verteilt. Eine gleichmäßige Verteilung des Schlupfes fördert die Reaktionsfähigkeit der Flexibilisierung und erzielt damit deutlichere Kostensenkungen.

Mit einer Vorlaufzeit von einer Periode – im Vergleich zu der Produktion ohne Vorlaufzeit – erreicht die Flexibilisierung weniger Kostensenkung. Dies lässt sich leicht durch die Verzögerungswirkung der Vorlaufzeit erklären. Die Vorproduktsicherheitsbestände können frühestens eine Periode nach deren Verwendung durch Losgrößenerhöhung der Nachfolgeprodukte wieder aufgefüllt werden, was sich durch schlechtere Gesamtperformance auswirkt.

## 6 Fazit und Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass für starre Produktionspläne mit dem Verfahren aus Kapitel 3.3.2 einfach und schnell Sicherheitsbestände für den Lost-Sales-Fall bestimmt werden können, solange die Sicherheitsbestände unabhängig voneinander sind.

Für andere Rahmenbedingungen kann das Simulationssystem, bestehend aus einem Simulator und einem Optimierer, zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen verwendet werden. Die Berechnungszeit wurde im Vergleich zum Ausgangssystem von Kemkes und Wirawan für eine Problemstruktur mit zehn Produkten, drei Ressourcen und 24 Perioden von mehreren Stunden auf wenige Minuten gesenkt. Neue Operatoren für den genetischen Algorithmus und ein zusätzliches Modul zur Feinsuche haben die Qualität der Ergebnisse verbessert.

Anstelle von Fehlmengenkosten werden nun Mindest- $\beta$ -Servicegrade verwendet, was wesentlich praxisnäher ist.

Die Ergebnisse der Experimente zeigen, dass eine Bestimmung von Sicherheitsbeständen für starre Produktionspläne unter verschiedensten Rahmenbedingungen möglich ist. Die Höhe des vorgegebenen  $\beta$ -Servicegrads beeinträchtigt das Verfahren nicht. Es kann demnach ein beliebiges Serviceniveau erreicht werden.

In der Literatur ist wenig über die Sicherheitsbestandsbestimmung im Zusammenhang mit einem flexibilisierten Produktionsplan zu finden. Es wurden Grundlagen zu diesem Thema erarbeitet und ein konkretes Verfahren entworfen. In Experimenten mit 112 Testfällen zeigte sich, dass mit der Flexibilisierung für generelle Produktionsstrukturen fast immer Kosten reduziert werden können. Im Mittel ergab sich eine Kostensenkung von 4 % im Vergleich zu äquivalenten Fällen mit starrem Produktionsplan. Für bestimmte Gruppen von Testfällen ergaben sich sogar mittlere Kostensenkungen von 8 %.

Die Analyse der Wirkungszusammenhänge bei der Sicherheitsbestandsbestimmung zeigte, dass der Bedarf an Sicherheitsbeständen stark von verschiedenen Rahmenbedingungen abhängt. So können beispielsweise unter bestimmten Umständen die Sicherheitsbestände bei starren Produktionsplänen gesenkt werden, wenn die Rüstfrequenz hoch ist oder ein hoher saisonaler Be-

stand vorliegt. Die Flexibilisierung zeigt beispielsweise bessere Ergebnisse, wenn die Rüstfrequenz höher oder mehr Schlupfkapazität frei ist. Geringe Vorlaufzeiten wirken sich ebenso positiv aus.

Warum für Fälle mit Backorders die Flexibilisierung bessere Resultate zeigt als für Lost-Sales-Fälle, konnte noch nicht begründet werden. Ebenfalls ist unklar, warum die Fälle mit Backorders bei starren Produktionsplänen höhere Sicherheitsbestände benötigen.

Betrachtet man sich die Prämissen aus Kapitel 3.2, muss allerdings festgestellt werden, dass von einigen in der Praxis relevanten Sachverhalten so stark abstrahiert wurde, dass für die Anwendbarkeit der Verfahren in der Praxis einige dieser Prämissen gelockert werden müssten. Hierdurch ergeben sich viele Möglichkeiten für weiterführende Untersuchungen. Es werden nun einige Vorschläge für Nachfolgearbeiten gemacht:

- Anstelle der konstanten Vorlaufzeiten könnten stochastisch variierende Vorlaufzeiten verwendet werden.
- Die Einschränkung von Vorlaufzeit nur als Produktionszeit ist ebenfalls nicht akzeptabel für Anwendungen in der Praxis. Eine Erweiterung um Transportzeiten wäre beispielweise sinnvoll. In diesem Fall wäre es angebracht, Sicherheitsbestände jeweils vor und nach dem Transportweg anzulegen.
- Es ist fraglich, ob die Veränderung von Losgrößen eines festgelegten Produktionsplans wirklich ohne zusätzliche Kosten möglich sein sollte. Die Verwendung von Schlupfrüstkosten könnte praxisnäher sein.
- Eine praxisnähere Implementierung von Backorders würde eine bestimmte Zufallsverteilung vorgeben, nach der für jede aufgetretene Backorder festgelegt wird, um wie viele Perioden später eine Nachlieferung vom Kunden noch angenommen wird.

Zusätzlich zur obigen Lockerung von Prämissen sind folgende Erweiterungsmöglichkeiten denkbar:

- Die konstante Vorgabe des zweiten Sicherheitsbestandsniveau ist nicht sinnvoll, musste hier aber aus Zeitmangel erfolgen. Es sollte versucht werden, beide Sicherheitsbestände gleichzeitig mit dem genetischen Algorithmus zu bestimmen.

- Die in der Praxis oft eingesetzte Methode der rollierenden Planung zur Reaktion auf unvorhergesehenen Einflüsse sollte mit der Sicherheitsbestandsbestimmung unter flexiblierter Produktion kombiniert werden. Für die bereits fixierten Zeitabschnitte der Rollierung könnten regelmässig (bei Verschiebung des Rollierungsfensters) Sicherheitsbestandsauffüllhöhen (2. Sicherheitsbestand) festgelegt werden. Das wiederholte Festlegen von anfänglich vorgegebenen Sicherheitsbeständen ist nicht sinnvoll, da dann bei einer Erhöhung des Sicherheitsbestands dessen Herkunft fraglich wäre.
- Als Vorstufe zum vorhergehenden Vorschlag, ist eine zyklische Aneinanderreihung von Planungszeiträumen denkbar. Alle angesammelten Sicherheitsbestände aus einer Umweltlage  $s$  ständen dann der Umweltlage  $s+1$  als Anfangsbestand zur Verfügung. Es wäre interessant zu untersuchen, wie sich bei einer solchen Vorgehensweise die Verhältnisse von erstem und zweitem Sicherheitsbestandsniveau verschieben.
- Da die verwendete Flexibilisierung nur auf einer Heuristik basiert, könnte versucht werden, ein Verfahren mit stochastischer Programmierung zu entwerfen, dass alle Entscheidungen im Rahmen der Flexibilisierung und Sicherheitsbestandsbestimmung so trifft, dass von einer optimalen Lösung gesprochen werden kann.
- Eine vollständig andere Herangehensweise an das Thema Unsicherheitsmanagement und Flexibilisierung wäre die Bestimmung von Sicherheitsvorlaufzeiten in Kombination mit zeitlichen Losverschiebungen anstelle der Bestimmung von Sicherheitsbeständen in Kombination mit Losgrößenveränderungen.

Es muss vermutet werden, dass je größer die Abstraktion von der Realität ist, desto einfacher lassen sich Sicherheitsbestände bestimmen. Beispielsweise ist die Bestimmung mittels analytischer Verfahren relativ leicht, sie basiert allerdings auf einer hohen Abstraktionsstufe.

Das verwendete Bestimmungsverfahren mit Simulation und Optimierer könnte um viele Detaillierungen aus der Praxis erweitert werden. Es können beispielsweise außer der Nachfrageunsicherheit noch diverse andere Unsicherheitsfaktoren berücksichtigt werden. Doch schon beim aktuellen in dieser Arbeit verwendeten Abstraktionsniveau und den relativ einfach gehaltenen Pro-

duktionsstrukturen mussten für den Optimierer und die Flexibilisierung jeweils Heuristiken verwendet werden, weil die große Problemkomplexität die Bestimmung von optimalen Lösung sehr schwierig macht.

Je praxisnaher demnach ein Bestimmungsverfahren ist, desto komplexer sind auch die zu lösenden Probleme.

Es besteht somit ein Zielkonflikt zwischen geringer Abstraktion (Praxisnähe) und der effizienten und präzisen Bestimmung von Sicherheitsbeständen. Die Akzeptanz von Verfahren zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen in der Praxis wird in Zukunft davon abhängig sein, ob dieser Zielkonflikt zufriedenstellend gelöst werden kann.

## Literaturverzeichnis

- Axsäter (2000)** Axsäter, Sven: Inventory Control, Boston et al.: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- Beasley (2002)** Beasley, J. E.: Stochastic Programming, OR-Notes, Online im Internet URL: [www.ms.ic.ac.uk/jeb/or/sp.html](http://www.ms.ic.ac.uk/jeb/or/sp.html), Abfrage vom 29.05.2002.
- Domschke / Scholl / Voß (1997)** Domschke, Wolfgang / Scholl, Armin / Voß, Armin: Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte, 2. Auflage, Berlin et al.: Springer, 1997.
- Christopher (1998)** Christopher, M.: Logistics and Supply Chain Management – Strategies for reducing cost and improving service, 2. Auflage, London et al., 1998.
- Fleischmann / Meyr / Wagner (2000)** Fleischmann, Bernhard / Meyr, Herbert / Wagner, Michael: Advanced Planning, in: Stadler, Hartmut / Kilger, Christoph (Hrsg.), Supply Chain Management and Advanced Planning, S. 57-71, Berlin et al.: Springer, 2000.
- Glaser / Geiger / Rohde (1991)** Glaser, Horst / Geiger, Werner / Rohde, Volker: PPS – Produktionsplanung und –steuerung; Grundlagen – Konzepte – Anwendungen, Wiesbaden: Gabler, 1991.
- Goldberg (1989)** Goldberg, David E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1989.
- Hammel / Bäck (1998)** Hammel, Ulrich / Bäck, Thomas: Optimierung in der Simulation: Evolutionäre Algorithmen, Computational Intelligence 38, 1998.
- Hartung (2002)** Hartung, Joachim: Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 13. Auflage, München, Wien: Oldenbourg, 2002.
- Ho / Carter / Melnyk / Narasimhan (1986)** Ho, Chrwan-jyh / Carter, Phillip L. / Melnyk, Steven A. / Narasimhan, Ram: Quantity Versus Timing Change In Open Order: A Critical Evaluation, in: Production and Inventory Management, First Quarter 1996, S. 122-136.

- 
- Hoover / Perry (1990)** Hoover, Stewart V. / Perry, Ronald F.: Simulation: A Problem-Solving Approach, Reading, Massachusetts et al.: Addison-Wesley, 1990.
- Inderfurth (2002)** Inderfurth, Karl: Unsicherheit im Supply Chain Management, Vortragsunterlagen zum Vortrag vor der Wissenschaftlichen Kommission „Logistik“ am 26.01.2002 in Bremen, 2002.
- Kempkes (2002)** Kempkes, Oliver (2002): Optimierung von Sicherheitsbeständen in Supply Chains mit Hilfe eines Simulationsmodells und eines Genetischen Algorithmus, Studienarbeit am Fachgebiet Fertigungs- und Materialwirtschaft, Institut für BWL, TU Darmstadt, 2002.
- de Kok (2001)** De Kok, Ton G.: Comparison Of Supply Chain Planning Concepts For General Multi-Item, Multi-Echelon Systems, BETA publicatie WP 63 (working paper), November 2001.
- Law / Kelton (1991)** Law, Averill M. / Kelton, W. David: Simulation Modeling & Analysis, 2. Auflage, New York et al.: McGraw-Hill, 1991.
- Meyr / Rohde / Stadtler / Sürie (2000)** Meyr, Herbert / Rohde, Jens / Stadtler, Hartmut / Sürie, Christopher: Supply Chain Analysis, in: Stadtler, Hartmut / Kilger, Christoph (Hrsg.), Supply Chain Management and Advanced Planning, S. 29-56, Berlin et al.: Springer, 2000.
- Michalewicz (1994)** Michalewicz, Zbigniew: Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 2. Auflage, Berlin et al.: Springer, 1994.
- Minner (2000)** Minner, Stefan: Strategic Safety Stocks in Supply Chains, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 490, Berlin et al.: Springer, 2000.
- Nissen (1998)** Nissen, Volker: Einige Grundlagen Evolutionärer Algorithmen, in: Biethahn, Jörg et al., Betriebswirtschaftliche Anwendungen des Soft Computing, Vieweg: Braunschweig/Wiesbaden, 1998, S. 55-78.

- 
- Rohde (2000)** Rohde, Jens: Coordination and Integration, in: Stadler, Hartmut / Kilger, Christoph (Hrsg.), Supply Chain Management and Advanced Planning, S. 183-194, Berlin et al.: Springer, 2000.
- Sauerbier (1999)** Sauerbier, Thomas: Theorie und Praxis von Simulationssystemen, Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1999.
- Schwefel (1995)** Schwefel, Hans-Paul: Evolution and Optimum Seeking, Sixth-Generation Computer Technology Series, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- Stadler (2000a)** Stadler, Hartmut: Materialwirtschaft, Skript WS 2000/01, Fachgebiet Fertigungs- und Materialwirtschaft, Institut für BWL, TU Darmstadt, 2000.
- Stadler (2000b)** Stadler, Hartmut: Multi-Level Lot-Sizing with Setup Times and Multiple Constrained Resources: Internally Rolling Schedules with Lot-Sizing Windows, Mai 2002.
- Stadler / Sürie (2000)** Stadler, Hartmut / Sürie, Christopher: Description of MLCLSP Test Instances, Online im Internet URL: [www.bwl.tu-darmstadt.de/bwl1/forschung/ti\\_mlclsp/TI\\_Description.pdf](http://www.bwl.tu-darmstadt.de/bwl1/forschung/ti_mlclsp/TI_Description.pdf), Abfrage vom 21.05.2002.
- Stadler (2002)** Stadler, Hartmut: Determining Safety Stock Levels in Supply Chains based on a given Master Plan, vom Autor zur Verfügung gestellt, 2002.
- Tempelmeier (1999)** Tempelmeier, Horst: Materiallogistik; Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung und das Supply Chain Management, 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin et al.: Springer, 1999.
- Wagner (2000)** Wagner, Michael: Demand Planning, in: Stadler, Hartmut / Kilger, Christoph (Hrsg.), Supply Chain Management and Advanced Planning, S. 97-115, Berlin et al.: Springer, 2000.
- Wirawan (2002)** Wirawan, Dody S.: Entwicklung und Implementierung eines Simulationsmodells zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen in Supply Chains, Studienarbeit am Fachgebiet Fertigungs- und Materialwirtschaft, Institut für BWL, TU Darmstadt, 2002.

## Anhang A: Wichtige Veränderungen im Quellcode

Zusätzlich zu den in Kapitel 4.2.3 und 4.3.3 beschriebenen Erweiterungen wurden noch einige andere Veränderungen am Quellcode vorgenommen. Es handelt sich um Fehlerbehebungen, Umstrukturierungen zur besseren Wartbarkeit bzw. Verständlichkeit und Laufzeitoptimierungen. Die wichtigsten Änderungen werden nun kurz beschrieben:

- Bei jedem Simulationsaufruf wurde die Modellstrukturdatei neu eingelesen. Da bei Computern Festspeicherzugriffe wesentlich langsamer als Hauptspeicherzugriffe erfolgen, wird die Modellstrukturdatei nun einmalig eingelesen und dann im Speicher vorgehalten. Es ergab sich eine Laufzeitreduktion von ca. 50 %.
- Alle Individuen sind nun mit einer Markierung versehen, die angibt, ob die zugeordnete Fitness gültig ist. Somit müssen Individuen, die unverändert von einer Generation in die nächste übernommen wurden, nicht neu mit der Simulation bewertet werden. Da ca. 20 % der Individuen in einer Generation nicht verändert werden, ergibt sich eine Laufzeitverkürzung um nochmals ca. 20 %.
- Alle Vorkommnisse der Begriffs „node“ wurden in „resource“ umbenannt, um Missverständnissen vorzubeugen. Unter einem „node“ hätte man auch Knoten innerhalb einer Gozinto-Struktur anstatt einer Produktionsressource verstehen können.
- Die Reihenfolge der ausgegebenen Sicherheitsbestände war falsch. Die Sicherheitsbestände wurden zwar in ihrer Höhe richtig bestimmt, aber in den Resultaten wurde beispielsweise dem Produkt mit der höchsten Nummer der Sicherheitsbestand des Produkts mit der Nummer eins zugewiesen.
- Da die Nachfrage normalverteilt bestimmt wird, können bei einer relativ großen Standardabweichung auch Werte kleiner null auftreten. Dies macht für Nachfragevariablen keinen Sinn und wurde behoben, so dass Werte kleiner null in einer Nachfrage von null resultieren.
- Die Roulette-Wheel-Strategie zur Rekombination war fehlerhaft. Sie wurde vollständig neu implementiert.

- Die Berücksichtigung von Vorlaufzeiten war fehlerhaft. Es wurden zur Einplanung von Vorlaufzeiten für ein Produkt die längste Vorlaufzeit aller Produkte verwendet.
- Das in Kapitel 4.4 erwähnte Ausgabemodul zur Verifikation der Simulation, lässt sich mit der Zeile `OVERVIEW_MATRIX_DEBUG = true;` in der Steuerungsdatei `SafetyStockConstants.java` einschalten. Die Ausgaben erfolgen entweder auf dem Bildschirm oder bei der Angabe einer Ausgabedatei (Kommandozeilenparameter „-o“) in diese Datei.
- Die Sekundärbedarfe werden nun bei Aufruf der ersten Simulation für alle Perioden und Produkte berechnet und dann so im Speicher abgelegt, dass sie bei allen weiteren Simulationsläufen wiederverwendet werden können. Dies bewirkte etwa ein Laufzeitverkürzung von nochmals 15 %.
- Es gibt einen neuen Kommandozeilenparameter „-r [Dateiname]“, der die Ausgabe aller gesammelten Kennzahlen in die angegebene Datei veranlasst. Ein weiterer Kommandozeilenparameter „-c“ startet die unabhängige Sicherheitsbestandsbestimmung nach dem Verfahren aus Kapitel 3.3.2. Alle Sicherheitsbestände werden auf null gesetzt und eine fälschlicherweise eingeschaltete Flexibilisierung wieder ausgeschaltet.
- Es gibt folgende neue Schlüsselwörter in der Modell-Strukturdatei: `BACKORDER 1/0` schaltet Backorders an (1) oder Backorders aus (0) bzw. Lost-Sales an. `USE_SLACK 1/0` schaltet die Flexibilisierung ein (1) oder aus (0). `MIN_BETA_SERVICE X` gibt den Mindest- $\beta$ -Servicegrad an, für den Sicherheitsbestände bestimmt werden sollen. Das alte Schlüsselwort „PERIODE\_LENGTH“ wurde in „PERIOD\_NUMBER“ umbenannt, um der Bedeutung „Anzahl der Perioden im Planungszeitraum“ gerecht zu werden.
- Aus dem Produktionsplan werden nun auch die Zeilen mit den Schlüsselwörtern „KAPA“ und „L0“ ausgelesen. Bei „KAPA“ handelt es sich um die verfügbaren Schlupfkapazitäten. „L0“ sind die Anfangsbestände für die Produktion mit Vorlaufzeiten.
- Mit dem Optimierer wurden Sicherheitsbestände für Eingangs- und Ausgangslager bestimmt. Da keine Eingangslager verwendet werden,

---

wurde deren Wert auf null fixiert. Eine solche Vorgehensweise behindert die Optimierung mit Hilfe des genetischen Algorithmus, denn es konnten so nur die Hälfte aller Sicherheitsbestände variiert werden. Rekombinations- und Mutationsraten wurde dadurch verfälscht. Alle Sicherheitsbestände für Eingangslager wurden aus der Optimierung entfernt.

- Der  $\beta$ -Servicegrad berechnet sich nun nicht mehr über den Mittelwert der  $\beta$ -Servicegrade aller einzelnen Umweltlagen, sondern über die kumulierten Lieferungen geteilt durch die kumulierten Bestellungen über alle Umweltlagen.
- Im Package „SafetyStock“ (das Simulationsmodul) waren alle Variablen vom Typ „float“, dieser hat aber nur eine Genauigkeit von ca. 7 Dezimalstellen. Die Losgrößen aus den Produktionsplänen haben eine Genauigkeit von bis zu 9 Dezimalstellen, was zu regelmäßigen Rechenfehlern führte, bis alle Variablen auf den Typ „double“ mit 16-stelliger Genauigkeit umgestellt wurden.
- Der Produktionsplan wird nun nicht mehr so im Speicher vorgehalten, wie er aus der Datei eingelesen wird, sondern objektorientiert und strukturiert nach Produkten und Perioden im Speicher abgelegt. Dadurch wird die Zugriffszeit auf den Produktionsplan stark verkürzt.
- Die interne Verwaltung von Primär- und Sekundärproduktbestellungen in Demand.java war nicht objektorientiert implementiert. Dies wurde nachgeholt und eine Laufzeitverkürzung von nochmals ca. 15 % erzielt.
- Alle Operatoren-Klassen wurden in ein Package „GAOperators“ ausgliedert, alle Klassen, die mit Datenstrukturen zu tun haben, in einem Package „DataStructures“ zusammengefasst.
- Es existiert nun für alle Operorentypen des genetischen Algorithmus eine abstrakte Klasse, die von konkreten Operatoren erweitert werden muss. Dies vereinheitlicht die Schnittstellen zwischen dem Steuerungsmodul des genetischen Algorithmus und den Operatoren.

## Anhang B: LP-Modell zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen

Model formulation:

$$\begin{aligned} \text{Min.} \quad & \sum_{j=1}^J (T \cdot S) \cdot h_j \cdot SS_j + \sum_j \sum_s (1/1000) \cdot h_j \cdot SS_{js}^{no} \\ & + \sum_j \sum_s \sum_t ((T-t+1)/(T \cdot 100)) \cdot h_j \cdot LS_{jts} \end{aligned} \quad (1.1)$$

subject to Lagerbilanzgleichungen (beachte: für  $t=0$  verwende  $I_{j0}$ , d.h. ohne Index  $s$ )

$$\underbrace{I_{j,t-1,s} + X_{jts}}_{\text{if } y_{jt}^{MP}=1} = P_{jts} - LS_{jts} + \sum_{\substack{k \in S_j \\ \text{if } y_{kt}^{MP}=1}} r_{jk} \cdot X_{k,t+\tau_k,s} + I_{jts} \quad \forall j=1, \dots, J, t=1, \dots, T, s=1, \dots, S \quad (1.2)$$

Kapazitätsbeschränkungen

$$\left( \sum_{j=1}^J a_{mj} \cdot X_{jts} + \sum_{j=1}^J st_{jm} \cdot Y_{jt}^{MP} \leq C_{mt} + O_{mt}^{MP} \right) \quad \forall m=1, \dots, M, t=1, \dots, T, s=1, \dots, S \quad (1.3)$$

Begrenzung der Fehlmengen pro Periode (Verlustfall) (upper bounds)

$$LS_{jts} \leq P_{jts} \quad \forall j=1, \dots, J, t=1, \dots, T, s=1, \dots, S \quad (1.4)$$

$\beta$ -Servicegraddefinition

$$\sum_s \sum_t LS_{jts} \leq (1 - \beta_j) \cdot \sum_s \sum_t P_{jts} \quad \forall j=1, \dots, J \quad (1.5)$$

Begrenzung der Produktionsmengen lt. vorgebenem Produktionsplan (upper bounds):

$$X_{jts} \leq (=) X_{jt}^{MP} \quad \forall j=1, \dots, J, t=1, \dots, T, s=1, \dots, S \quad \text{and if } y_{jt}^{MP}=1 \quad (1.6)$$

Vorgabe Safety Stocks (Variable!) zu Beginn des Planungszeitraums

$$I_{j0} = SS_j + LOT_{j0} + SEAS_{j0} \quad \forall j=1, \dots, J \quad (1.7)$$

Vorgabe Safety Stocks am Ende des Planungszeitraums

$$I_{jTs} \geq SS_j - SS_{js}^{no} + LOT_{jT} + SEAS_{jT} \quad \forall j=1, \dots, J, s=1, \dots, S \quad (1.8)$$

Begrenzung der Nichtauffüllung des Sicherheitsbestandes am Ende des Planungszeitraums T:

$$SS_{js}^{no} \leq SS_j \quad \forall j=1, \dots, J, s=1, \dots, S \quad (1.9)$$

NNB

$$\left. \begin{aligned} I_{jis} &\geq 0 && \forall j=1, \dots, J, t=1, \dots, T-1, s=1, \dots, S \\ LS_{jts} &\geq 0 && \forall j=1, \dots, J, t=1, \dots, T, s=1, \dots, S \\ SS_j &\geq 0 && \forall j=1, \dots, J \\ SS_{js}^{no} &\geq 0 && \forall j=1, \dots, J, s=1, \dots, S \\ X_{jts} &\geq 0 && \forall j=1, \dots, J, t=1, \dots, T, s=1, \dots, S, \text{ if } y_{jt}^{MP} = 1 \end{aligned} \right\} (1.20)$$

$$(O_{mt} \geq 0 \quad \forall m=1, \dots, M, t=1, \dots, T)$$

*Indices and index sets:*

- $J$  Items or operations (e.g. end products, intermediate products, raw materials),  $j=1, \dots, J$
- $(m$  Resources (e.g. personnel, machines, production lines),  $m=1, \dots, M)$
- $s$  Scenario (a time series of random data, e.g. demands, over T periods),  $s=1, \dots, S$
- $t$  Periods,  $t=1, \dots, T$
- $S_j$  Set of immediate successors of item  $j$  in the bill of material

*Data:*

- $a_{mj}$  Capacity needed on a resource  $m$  for one unit of item  $j$
- $\beta_j$  required fill rate for product  $j$  in planning interval  
(amount delivered in time over total demand)
- $(C_{mt}$  Available capacity of resource  $m$  in period  $t)$
- $h_j$  Holding cost for one unit of item  $j$  in a period
- $(oc_{mt}$  Overtime cost for one unit of resource  $m$  in period  $t)$
- $LOT_{j0}$  Lotsize stock of item  $j$  at the *beginning* of the planning horizon
- $LOT_{jT}$  Lotsize stock of item  $j$  at the *end* of the planning horizon
- $P_{jts}$  Primary, gross demand for item  $j$  in period  $t$  in scenario  $s$

- (with  $P_{jT}$  including final inventory, if given for the planning horizon  $T$ )
- $r_{jk}$  Number of units of item  $j$  required to produce one unit of the immediate successor item  $k$
- $SEAS_{j0}$  Seasonal stock of item  $j$  at the *beginning* of the planning horizon
- $SEAS_{jT}$  Seasonal stock of item  $j$  at the *end* of the planning horizon
- $(st_{jm}$  Setup time for item  $j$  on resource  $m$ )
- $\tau_j$  lead time for item  $j$  (integer number of periods)
- $X^{MP}_{jt}$  Production amount of item  $j$  in period  $t$  (lot-size) as given in the master plan
- $Y^{MP}_{jt}$  1, if a setup is planned for item  $j$  in period  $t$  in the given master plan, 0 otherwise

*Variables:*

- $I_{jts}$  Inventory of item  $j$  at the end of period  $t$  in scenario  $s$
- $(O_{mt}$  Amount of overtime on resource  $m$  used in period  $t$ )
- $LS_{jts}$  Lost sales of item  $j$  in period  $t$  in scenario  $s$
- $SS_j$  Safety stock of item  $j$  provided at the beginning of the planning interval (evtl.  $SS_{jt}$ , d.h. periodenabhängig (siehe auch: Mengenkontinuitäts-, Kapazitätsbedingung. und Zielfunktion)
- $SS^{no}_{js}$  missing safety stock of item  $j$  at the *end* of the planning interval in scenario  $s$
- $X_{jts}$  Production amount of item  $j$  in period  $t$  (lot-size) in scenario  $s$  (evtl. als Datum vorgeben)