



Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Wirtschaftsinformatik, insb. CIM

Dissertation

Mehrziel-Optimierung in Multi-Projekt-Liefernetzwerken unter Material-, Kapital- und Betriebsmittel-Restriktionen

Jan-Patrick Pater

Mehrziel-Optimierung in Multi-Projekt-Liefernetzwerken unter Material-, Kapital- und Betriebsmittel-Restriktionen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Wirtschaftswissenschaften
(Dr. rer. pol.)

vorgelegt von

Jan-Patrick Pater, M.Sc.
80807 München

Paderborn, Dezember 2014

Dekan: Prof. Dr. Martin Schneider
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier
Korreferentin: Prof. Dr. Leena Suhl

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....iii

Tabellenverzeichnisv

1	Einleitung.....	1
2	Problemstellung.....	3
2.1	Eigenschaften des Multi-Projekt-Liefernetzwerks	3
2.1.1	Struktur und Organisation	3
2.1.2	Steuerung des Liefernetzwerks.....	7
2.1.3	Projekteigenschaften.....	10
2.2	Anforderungsbeschreibung	15
2.2.1	Zielvorgabe Liefertreue	15
2.2.2	Nebenbedingungen	22
3	Stand der Technik.....	29
3.1	Allgemeingültige Planungskonzepte zur Berücksichtigung von Unsicherheit	29
3.1.1	Bewältigungsmaßnahmen nach Schneeweiß.....	29
3.1.2	Fehlteilmanagement.....	30
3.2	Umgang mit Unsicherheit im Rahmen des MRP-II-Konzepts	32
3.2.1	Klassifizierung der Maßnahmen.....	32
3.2.2	Planung von Sicherheitsbeständen und -zeiten	38
3.3	Mehrzieloptimierung unter Unsicherheit	47
3.3.1	Ermittlung der effizienten Alternativen.....	50
3.3.2	Eindeutige Lösungsauswahl	54
3.3.3	Simulationsbasierte Optimierung	57
4	Zu leistende Arbeit.....	62
5	Konzeption.....	64
5.1	Proaktives Verfahren	64
5.1.1	Definition der Szenario-Daten.....	66
5.1.2	Modell der simulationsbasierten Optimierung	70
5.1.3	Genetischer Algorithmus zur Optimierung von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten	75

5.1.4	Diskrete, eventbasierte Simulation auf MRP-Basis zur Evaluierung der Liefertreue.....	86
5.1.5	Automatisiertes Auswahlverfahren.....	97
5.1.6	Manuelles Auswahlverfahren	99
5.1.7	Berücksichtigung der rollierenden Planung.....	100
5.2	Reaktives Verfahren	103
5.2.1	Evaluation der Störungsauswirkungen	104
5.2.2	Lösungsfindung.....	106
6	Implementierung	109
6.1	Abbildung des Szenarios	109
6.2	Implementierung der genetischen Komponenten.....	110
6.3	Implementierung der MRP-Ablaufsimulation.....	123
6.4	Erweiterung des Auswahlinterfaces	128
7	Evaluation	132
7.1	Szenario	132
7.2	Evaluation des proaktiven Verfahrens	136
7.2.1	Qualitätsindikatoren	136
7.2.2	Einfluss der Parameter	137
7.2.3	Vergleich mit der Zufallssuche	144
7.2.4	Optimierung der Laufzeit.....	146
7.3	Einsatzkriterien für Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten	147
7.4	Skalierbarkeit.....	150
8	Fazit und Ausblick.....	152
9	Literaturverzeichnis	154
10	Anhang	168

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Adaptive Maßnahmen für den Industrietransfer.....	2
Abbildung 2.1: Modell der intra-organisatorischen Supply Chain.....	5
Abbildung 2.2: Vergleich der Bevorratungsebenen	6
Abbildung 2.3: MRP-II-Konzept.....	8
Abbildung 2.4: Value-Added-Services im Kontext.....	11
Abbildung 2.5: Liefertreue im Kontext	16
Abbildung 2.6: Beispiel für eine 65%-Liefertreue	17
Abbildung 2.7: Liefertreue von Komplettliefierungen und Kits	19
Abbildung 2.8: Auftrags-Interdependenzen	20
Abbildung 2.9: Einflussfaktoren der Kapitalrendite.....	23
Abbildung 2.10: Quellen der Unsicherheit	26
Abbildung 2.11: Rollierende Planung	27
Abbildung 3.1: Dualer Ansatz	30
Abbildung 3.2: Auswahl von Maßnahmen zur Bewältigung von Unsicherheit.....	33
Abbildung 3.3: Auswirkungen der Sicherheitszeit	35
Abbildung 3.4: Rescheduling-Framework.....	36
Abbildung 3.5: Kodierung des genetischen Algorithmus.....	43
Abbildung 3.6: Berücksichtigungszeitpunkte der Präferenzen.....	49
Abbildung 3.7: Ablaufschema eines genetischen Algorithmus	53
Abbildung 3.8: Lösungsauswahl-Prozess	56
Abbildung 3.9: Auswahlinterface	56
Abbildung 3.10: Ablaufschema einer ereignisorientierten Simulation	58
Abbildung 3.11: Simulation als Bewertungsfunktion.....	60
Abbildung 4.1: Bausteine der hybriden Absicherung.....	62
Abbildung 5.1: Ablauf des proaktiven Verfahrens	64
Abbildung 5.2: Definition der Szenario-Daten.....	67
Abbildung 5.3: Grafische Darstellung der relativen und kumulierten Häufigkeit	69
Abbildung 5.4: Kodierung des Chromosoms	77
Abbildung 5.5: Restriktionsbedingte Interdependenzen zwischen Genen	78
Abbildung 5.6: Berücksichtigung der Restriktionen vor der Fitnessbewertung.....	80
Abbildung 5.7: Übergeordneter Ablauf der Simulationsbewertung	87

Abbildung 5.8: Schritte der Ablaufsimulation	88
Abbildung 5.9: Planaufträge zu einem Kundenauftrag	90
Abbildung 5.10: Ereignisroutinen für Bestellanforderungen	92
Abbildung 5.11: Ereignisroutinen für Umlagerbestellungen	93
Abbildung 5.12: Ereignisroutinen für Fertigungsaufträge	94
Abbildung 5.13: Ereignisroutinen für Kundenaufträge.....	95
Abbildung 5.14: Ereignisroutine für den Zugang von Sicherheitsbestand	95
Abbildung 5.15: Hilfsroutine für die Warteschlangenlogik.....	96
Abbildung 5.16: Hilfsroutine für die Materialentnahme aus dem Lager	96
Abbildung 5.17: Manueller Prozessablauf	99
Abbildung 5.18: Fixierung von Entscheidungen bei Eintritt in die Frozen Zone	101
Abbildung 5.19: Ablaufschema des reaktiven Verfahrens.....	103
Abbildung 5.20: Termingrenzen bei Verspätungen von Planaufträgen	104
Abbildung 5.21: Verwendung des dynamischen Sicherheitsbestands	105
Abbildung 5.22: Beispiel für ein partielles Rescheduling.....	107
Abbildung 6.1: Struktur des jMetal-Frameworks	110
Abbildung 6.2: Klassenstruktur der Implementierung	111
Abbildung 6.3: Single-Point-Crossover	119
Abbildung 6.4: d ³ fact Scheduling-Komponenten	123
Abbildung 6.5: Klassenstruktur für Eventroutinen	126
Abbildung 6.6: Zielwert-Dialog	128
Abbildung 6.7: Auswahl-Interface	129
Abbildung 6.8: Detailfenster für Sicherheitszeiten	130
Abbildung 6.9: Detailfenster für Sicherheitsbestände.....	131
Abbildung 7.1: Liefernetzwerk des Evaluationsszenarios	132
Abbildung 7.2: Gozintographen für Produkte der Gruppe B	134
Abbildung 7.3: Verteilungen der Lieferterminabweichungen	134
Abbildung 7.4: Liefertreue und Kapitalbindung im Vergleich	144
Abbildung 7.5: Vergleich des genetischen Algorithmus mit der Zufallssuche.....	145
Abbildung 10.1: Verlauf der Qualitätsindikatoren Experiment 15	173

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Auftragsliefertreue für einen vollständigen Auftrag.....	19
Tabelle 3.1: Zusammenfassung der Verfahren	45
Tabelle 3.2: Bedeutung der evolutionären Begrifflichkeiten.....	52
Tabelle 5.1: Erfassung der Terminabweichungen	68
Tabelle 5.2: Häufigkeitswerte der Abweichungsausprägungen	69
Tabelle 5.3: Ereignisse und auslösende Elemente	90
Tabelle 5.4: Auftragsbeispiel zur automatischen Lösungsauswahl	97
Tabelle 5.5: Finale Lösungsauswahl in Abhängigkeit der Gewichtung	99
Tabelle 7.1: Eigengefertigte Produkte und Komponenten.....	133
Tabelle 7.2: Kaufteile	133
Tabelle 7.3: Kundenaufträge.....	135
Tabelle 7.4: Allgemeingültige Qualitätsindikatoren.....	136
Tabelle 7.5: Problemspezifische Qualitätsindikatoren	137
Tabelle 7.6: Allgemeine Evaluationsparameter.....	138
Tabelle 7.7: Variable Evaluationsparameter.....	139
Tabelle 7.8: Parameter der Experimente.....	139
Tabelle 7.9: Qualitätsindikatoren der Experimente	140
Tabelle 7.10: Statistiken der Experimente	141
Tabelle 7.11: Parameter der erweiterten Experimente.....	143
Tabelle 7.12: Qualitätsindikatoren der erweiterten Experimente	143
Tabelle 7.13: Statistiken der erweiterten Experimente	143
Tabelle 7.14: Qualitätsindikatoren der Zufallssuche	145
Tabelle 7.15: Statistiken der Zufallssuche	145
Tabelle 7.16: Verteilung der Sicherheitsmaßnahmen	147
Tabelle 7.17: Qualitätsindikatoren bei ausgeschlossenen Sicherheitsbeständen	148
Tabelle 7.18: Statistiken bei ausgeschlossenen Sicherheitsbeständen.....	148
Tabelle 7.19: Verteilung der Sicherheitsmaßnahmen nach Einschränkung der Sicherheitsbestände	149
Tabelle 7.20: Qualitätsindikatoren bei 20 Aufträgen.....	150
Tabelle 7.21: Statistiken bei 20 Aufträgen	150
Tabelle 10.1: Generierte Planaufträge mit 10 Kundenaufträgen	168
Tabelle 10.2: Korrelationswerte Experiment 15	173

1 Einleitung

Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen produzierende Unternehmen heutzutage mehr als nur innovative Produkte zu attraktiven Preisen anbieten. Die konventionellen Wettbewerbsfaktoren wie Technologievorsprung, Preis-Leistungsverhältnis, Design und Qualität verlieren zunehmend Einfluss auf die Kaufentscheidungen der Kunden, da alle Unternehmen in diesen Bereichen kontinuierlich Optimierungen durchführen und so die Unterschiede für den Kunden nur noch marginal sind.

Deswegen rückt die Kundenzufriedenheit als Erfolgspotenzial immer stärker in den Fokus, da diese sich nachhaltig auf Neukundengewinnung, langfristige Kundenbindung und Verhandlungspositionen auswirkt¹. Produkte und Preise sind dann die Basiselemente, auf denen unterschiedliche Strategien zur Steigerung der Zufriedenheit aufbauen. Dazu werden immer mehr ergänzende Servicedienstleistungen neben dem eigentlichen Produkt eingesetzt, die langfristig Wettbewerbsvorteile erzielen sollen².

Der Ursprung vieler Optimierungs- und Dienstleistungskonzepte findet sich dabei in der Automobilindustrie. Beispiele sind Lean Production, das Just-in-time-Konzept (JIT) sowie Komplettlieferungen und Kitting. Lean Production ist ein ganzheitliches Produktionskonzept mit dem Ziel der Steigerung der Effizienz durch die Vermeidung von Verschwendungen. Eine Maßnahme dazu ist beispielsweise das Just-in-time-Konzept, bei dem das richtige Teil in der richtigen Menge zum richtigen Zeitpunkt bereitgestellt wird, um so überflüssige Bestände zu verringern. Kitting und Komplettlieferungen sind logistische Zusatzleistungen, die der kundenseitigen Effizienzsteigerung dienen, indem alle für einen Montageschritt benötigten Teile in einer gemeinsamen Lieferung versendet werden.

Diese Konzepte und Methoden werden auch in andere Industriezweige übertragen. Die Adaption ist jedoch problematisch aufgrund der ursprünglichen Auslegung auf die homogene Automobilindustrie. Unterschiedliche Produkte mit unterschiedlichen Produktionsprozessen und logistischen Abläufen sowie individuelle Strukturen von Lieferanten und Kunden führen zu abweichenden und damit nicht optimalen Voraussetzungen. Ein 1:1-Transfer der Konzepte wirkt sich dadurch negativ auf die Kundenzufriedenheit aus, beispielsweise durch Verschlechterung von elementaren Kennzahlen wie der Liefertreue. Um dies zu vermeiden, sind, wie in Abbildung 1.1 dargestellt, adaptive Maßnahmen zur Anpassungen an die jeweiligen Unternehmen bzw. Industrien notwendig.

¹ Siehe [Neun09], S. 20–28.

² Siehe [GT12], S. 32 f.

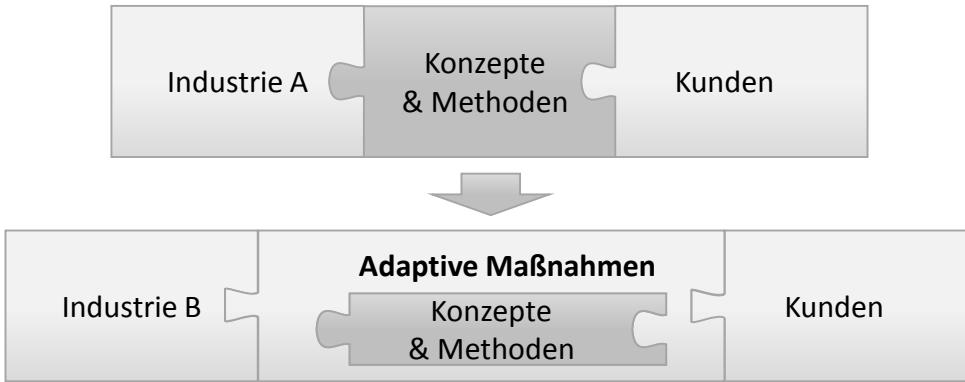


Abbildung 1.1: Adaptive Maßnahmen für den Industrietransfer

Die adaptiven Maßnahmen unterliegen zusätzlich dem Dilemma der begrenzten Mittel. Jedes Unternehmen handelt nach wirtschaftlichen Maximen, dementsprechend sind die Mittel zur Anpassung und Erreichung der Ziele endlich. Daher sind beispielsweise im Bereich der Kundenzufriedenheit Entscheidungen darüber notwendig, welche Kundenbedürfnisse erfüllt werden und welche nicht.

In dieser Arbeit werden adaptive Maßnahmen für ein verallgemeinertes Liefernetzwerk eines realen Zulieferers aus der Schienenfahrzeug-Industrie konzipiert³. Bei dem betrachteten Zulieferer wirkt sich die Einführung von Kitting und Komplettlieferungen in Kombination mit der JIT-Belieferung der Kunden negativ auf die Liefertreue der in verschiedenen Projekten zusammengefassten Aufträge aus. Um dem entgegenzuwirken, wird zur Maximierung der individuellen Liefertreue der Aufträge ein Framework für die Generierung und Verwendung von Sicherheitszeiten und dynamischen Sicherheitsbeständen entwickelt. Das Dilemma der begrenzten Mittel wird dabei durch eine vorgegebene Kapitalbindungsobergrenze berücksichtigt.

³ Siehe Beschreibung der Schienenbremse GmbH in [Dang09], S. 1319–1325, für ein Unternehmensbeispiel unter ähnlichen Rahmenbedingungen.

2 Problemstellung

2.1 Eigenschaften des Multi-Projekt-Liefernetzwerks

2.1.1 Struktur und Organisation

Der betrachtete Zulieferer hat sich aufgrund der fortschreitenden Globalisierung vom lokalen zum globalen Produzenten entwickelt⁴. Mit der Erschließung neuer Standorte und Märkte oder der Übernahme und Integration von bestehenden Unternehmen sind grenzübergreifende Produktions- und Liefernetzwerke entstanden⁵. Diese Netzwerke werden auch als Supply Chain bezeichnet⁶. Dabei ist eine Supply Chain definiert als ein „globales Netzwerk, um Produkte und Dienstleistungen zu liefern, und zwar vom Rohmaterial bis hin zu den Verbrauchern, über einen organisierten Fluss von Information, physischer Verteilung und Zahlung“⁷. In der Literatur finden sich unzählige weitere Definitionen, wobei an dieser Stelle stellvertretend noch die Definition von Corsten und Gabriel genannt sei, die eine Supply Chain als „Netzwerk von Fähigkeiten mit verschiedenen Optionen des Material- und Informationsflusses“ beschreiben, in dem mehrere Lieferanten und Kunden auf jeder Wertschöpfungsstufe existieren und Netzwerke als Organisationsform „in besonderer Weise die gestiegene Komplexität der Austauschbeziehungen widerspiegeln“⁸.

Der Begriff Supply Chain lässt sich bei großen Unternehmen mit mehreren Standorten, wie im betrachteten Beispiel, auch intern anwenden. Die durch die globalen Produktions- und Liefernetzwerke aufgespannten Beziehungen werden dann als intra-organisatorische Supply Chains bezeichnet. Der Vorteil gegenüber inter-organisatorischen Supply Chains ist die durch zentrales Management vereinfachte Steuerung und Entscheidungsfindung⁹.

⁴ Vgl. [KS08], S. 191 und [Pföh10], S. 337 f.

⁵ Neuner definiert Produktionsnetzwerke als „mehrere geographisch verteilte Produktionsaktivitäten im Sinne von Standorten, Ressourcen und deren Interdependenzen“ [Neun09], S. 7 f. Für weitere Definitionen dieses Begriffes siehe auch [Schö11], S. 12.

Ein Liefernetzwerk ist nach Zäpfel „eine auf die Realisierung von Wettbewerbsvorteilen zielende reziproke – meist kooperative, stabile – Beziehung von häufig rechtlich selbstständigen, wirtschaftlich jedoch mehr oder weniger abhängigen Unternehmen“ [ZS06], S. 41.

⁶ Siehe [Temp06b], S. 11. Alternativ wird in vielen Werken mit Logistikschwerpunkt die Bezeichnung Logistiknetzwerk verwendet. Vgl. z. B. [Schö11], S. 12, [Gude10], S. 16–20, [AIK+08], S. 934.

⁷ [Schö11], S. 13 mit Verweis auf [Blac10].

⁸ [CG04], S. 8 mit Verweis auf [ABH+95].

⁹ Siehe [SK05], S. 9 f.

Zur Beschreibung der betrachteten Supply Chain werden nachfolgend einige grundlegende Definitionen festgelegt. Die Standortstruktur lässt sich mittels folgender Informationen beschreiben.¹⁰

- Anzahl, geografische Lage und Funktionen der **Quellen** (dargestellt als Kreise)
- Anzahl, geografische Lage und Funktionen der **Produktions- bzw. Logistikstationen** zwischen den Quellen und Senken (Rechtecke bzw. Dreiecke)
- Anzahl, geografische Lage und Funktionen der **Senken** (Pentagone)

In einem Netzwerkmodell stellen diese Elemente die Knoten dar, während gerichtete Kanten die Transportverbindungen des Netzwerks abbilden¹¹. Liegen mehrere Knoten zwischen Quellen und Senken, so spricht man von einem mehrstufigen Netzwerk¹².

Zur Beschreibung der Produktstruktur und Abgrenzung der verschiedenen Materialien werden folgende Definitionen herangezogen¹³:

- **Produkt:** Auch Fertigfabrikat genannt, geht in der Regel in kein anderes Produkt mehr als Komponente ein.
- **Komponente:** Ein Gut, das in ein weiteres Produkt eingeht, zum Beispiel durch Montage. Weitere Untergruppen von Komponenten sind Zwischenprodukte, die während der Fertigung entstehen oder auf Lager gehalten werden, sowie Baugruppen, die ein Zwischenprodukt aus mindestens zwei Komponenten sind.
- **Rohmaterial:** Entspricht unbearbeitetem Material bzw. einem Ausgangsgut für die Herstellung.
- **Teile:** Eigenteile sind selbst gefertigt, Kaufteile über Lieferanten bezogen und gehen in der Regel in andere Produkte ein.

Die hergestellten Produkte des Unternehmens weisen einen hohen Anteil von kundenindividuellen Konstruktionen auf und sind vorwiegend komplexe mechatronische Geräte mit höherer Fertigungstiefe¹⁴. Diese lassen sich in verschiedene, klar abgrenzbare Produktgruppen unterteilen, die gruppenübergreifend nur geringfügige Überschneidungen bezüglich der verwendeten Komponenten aufweisen. Zusätzlich werden über Lieferanten beschaffte Kaufteile an den Endkunden weiterverkauft.

¹⁰ In Anlehnung an [Gude10], S. 16–20. Vgl. auch [Neun09], S. 7 f.

¹¹ Vgl. [AIK+08], S. 934.

¹² Vgl. [Gude10], S. 19.

¹³ [Schö11], S. 4 und ebd., S. 21.

¹⁴ „Anzahl der Wertsteigerungsstufen eines Erzeugnisses, die in einem Betrieb realisiert werden“. [GT12], S. 8.

Abbildung 2.1 zeigt eine Ausprägung der intra-organisatorischen Supply Chain des betrachteten Unternehmens, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit als repräsentatives Beispiel dient.

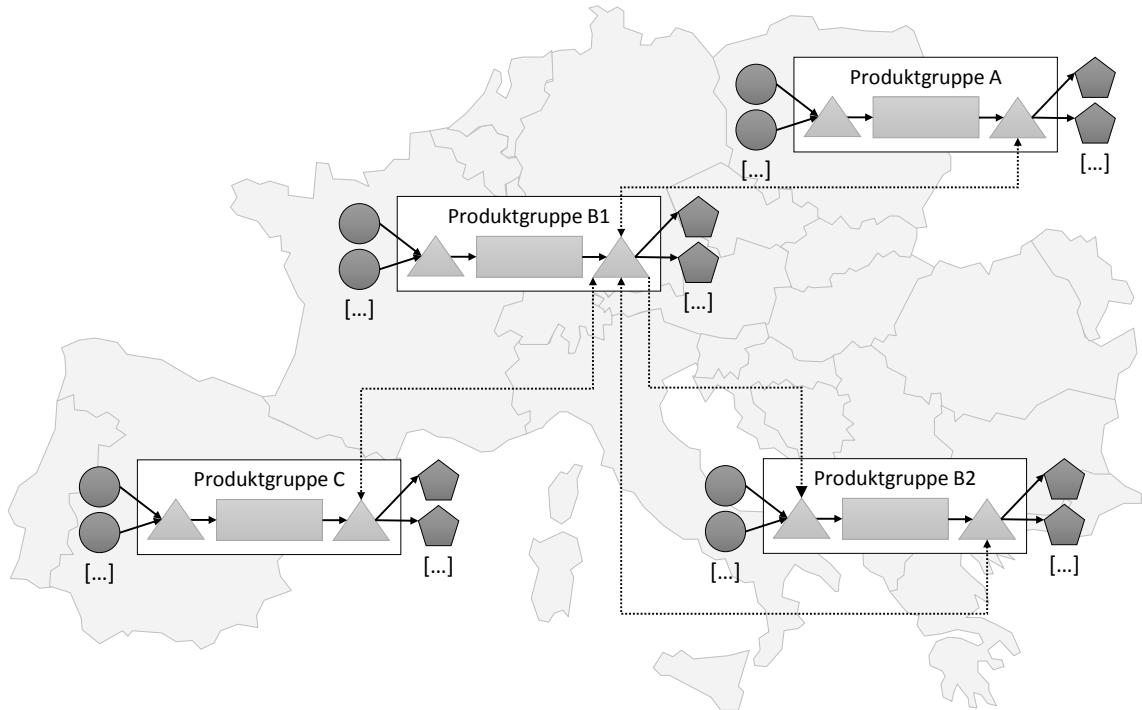


Abbildung 2.1: Modell der intra-organisatorischen Supply Chain

Da der Produktionsprozess als Input-Output-System¹⁵ betrachtet wird, sind jeweils zwei Logistikstationen und eine Produktionsstation zu einem produzierenden Werk zusammengefasst. In jedem Werk dient eine Logistikstation als Wareneingangslager für Rohmaterialien, Komponenten und Kaufteile und die zweite fungiert als Warenausgangslager für Produkte sowie Komponenten und Kaufteile. Die jeweiligen Wareneingangslager beziehen ihre Kaufteile von unterschiedlichen, an dieser Stelle nur repräsentativ dargestellten externen Lieferanten¹⁶. Von den Warenausgangslagern aus werden Produkte und Kaufteile an diverse Kunden ausgeliefert.

Die eingezeichneten Kanten spiegeln die Transportbeziehungen wider, wodurch ersichtlich ist, dass die Produktionsstandorte wechselseitig untereinander verbunden sind. Zum einen fungiert der Produktionsstandort der Produktgruppe B1 als interne Quelle für den

¹⁵ Die Produktion entspricht dabei einem Transformationsprozess für Güter, der aus Produktionsfaktoren als Input den Output in Form von Produkten erzeugt. Die Produktionsfaktoren können dabei materiell oder immateriell sein und umfassen alles zur Produktion Notwendige, wie z. B. Einsatzmaterialien, Patente und Lizenzen, Maschinen oder Personal. Siehe [Dang09], S. 1 f. und [GT12], S. 6–8.

¹⁶ Diese können intern wiederum ähnlich unterteilt sein.

Standort der Produktgruppe B2 und liefert werksübergreifend Komponenten für die weitere Verarbeitung zu verkaufsfähigen Produkten. Zum anderen sind die Warenausgangslager untereinander verbunden, wodurch Erzeugnisse verschiedener Produktgruppen vor der Auslieferung gebündelt werden können. Dies geschieht aufgrund von Synergieeffekten vorwiegend im Warenausgangslager des Werks für die Produktgruppe B1. In dieser daraus resultierenden mehrstufigen Netzwerkstruktur werden die Produkte mit konvergierender Erzeugnisstruktur¹⁷ entsprechend durch eine Mischung von zentraler und dezentraler Produktion erzeugt¹⁸.

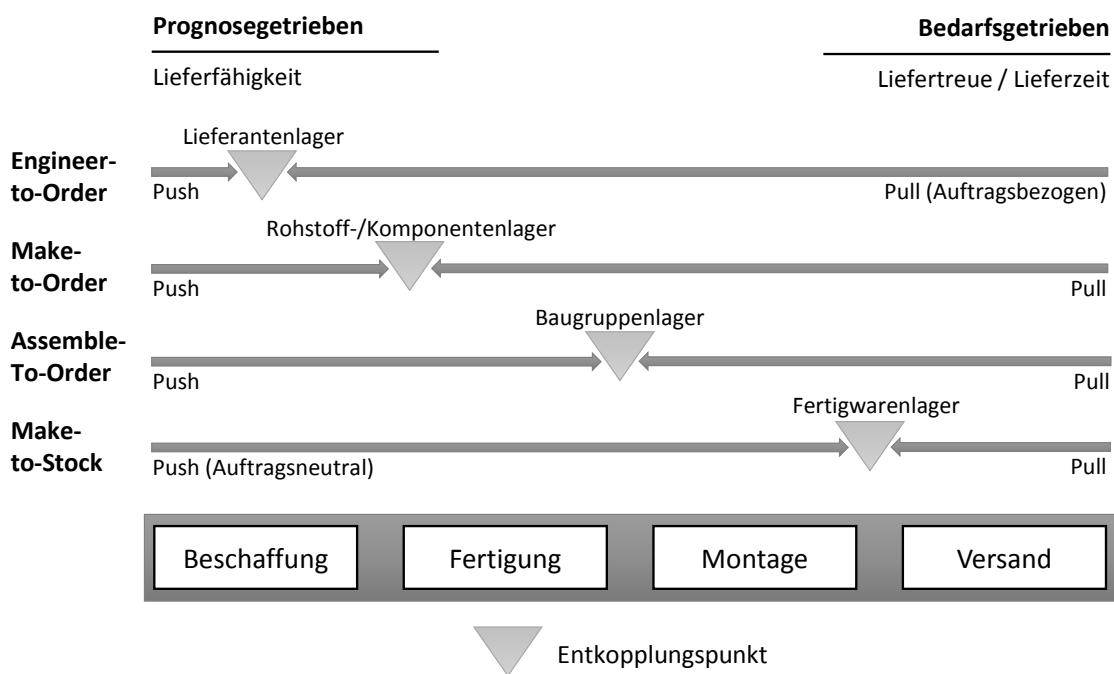


Abbildung 2.2: Vergleich der Bevorratungsebenen¹⁹

Aufgrund der branchenspezifischen Erwartungen an die Lieferzeiten²⁰ und an die Liefertreue²¹ werden von den in Abbildung 2.2 vergleichend dargestellten Produktionsstrategien die Projekteinzelfertigung (Engineer-to-order, ETO) und die Auftragsfertigung

¹⁷ Für weitere Strukturen vgl. ebd., S. 188 und [AIK+08], S. 935–937.

¹⁸ Bei zentraler Produktion wird ein Produkt nur an einem Standort hergestellt, bei dezentraler Produktion erfolgen die Arbeitsschritte bzw. Montageschritte für ein Produkt an verschiedenen Standorten. Siehe [Schö11], S. 122.

¹⁹ In Anlehnung an [Hopp08], S. 255 und [Koli01], S. 11 ff.

²⁰ Siehe [Alic05], S. 52 und [Hopp08], S. 252 f. Die Lieferzeit verlängert sich dabei durch steigenden Anteil von kundenauftragsbezogener Produktion, was aufgrund der höheren Relevanz der Liefertreue von den Kunden jedoch akzeptiert wird. Vgl. [Dang09], S. 1280 f.

²¹ Vgl. Kapitel 2.2.1.

(Make-to-order, MTO) im Liefernetzwerk eingesetzt²². Bei beiden Strategien erfolgt fast keine Bevorratung anhand von Prognosen, da mit der Produktion und Beschaffung erst nach Eingang eines Kundenauftrags begonnen wird. Welche Strategie im Einzelfall eingesetzt wird, hängt von den in Kapitel 2.1.3 vorgestellten Projektarten ab.

Aus den verwendeten Strategien in Kombination mit der komplexen Produktstruktur resultiert der Einsatz des Organisationskonzepts der Kundeneinzelfertigung, bei der alle Aktivitäten nur durch Kundenaufträge angestoßen werden und dementsprechend nur auftragsgebundene Bestände existieren²³. Aufgrund der geringen Bevorratungsebene können sich deswegen schon kleine Störungen bei der Beschaffung oder Produktion negativ auf die Liefertreue auswirken.

2.1.2 Steuerung des Liefernetzwerks

Die übergeordnete Zielsetzung bei der Steuerung dieses mehrstufigen Liefernetzwerks ist die Erfüllung aller Kundenbedürfnisse bei gleichzeitiger Optimierung der dabei entstehenden Kosten²⁴. Diese Zielsetzung entspricht der des Supply-Chain-Managements²⁵.

Eine effiziente Unterstützung bietet dabei ein in vielen Unternehmen eingesetztes Enterprise-Resource-Planning-System (ERP-System), das zur Planung, Steuerung und Durchführung aller belegorientierten²⁶ Geschäftsprozesse eingesetzt wird²⁷. Das wichtigste Modul in einem ERP-System für die Steuerung des Liefernetzwerks ist das Produktionsplanungs- und Steuerungssystem (PPS-System). Seine Aufgabe ist „der bestmögliche

²² Die Strategien unterscheiden sich dabei primär anhand der Lage des Kundenentkopplungspunktes, welcher auftragsneutrale von auftragsbezogener Fertigung abgrenzt. Für eine ausführliche Beschreibung vgl. [Hopp08], S. 253–257, [SSE06], S. 3 ff. und [NNS10], S. 869.

²³ Siehe [Dang09], S. 1303–1305. Für mehr Informationen zu Serien- und Einzelproduktion vgl. [GT12], S. 12.

²⁴ Siehe [AIK+08], S. 460.

²⁵ Arnold, Isermann und Kuhn definieren dieses „als die integrierte prozessorientierte Planung und Steuerung der Waren-, Informations- und Geldflüsse entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Rohstofflieferanten bis hin zum Konsumenten, mit den Zielen der Verbesserung, der Kundenorientierung, der verbesserten Synchronisierung der Versorgung mit dem Bedarf, der Flexibilisierung und bedarfsgerechten Produktion sowie dem Abbau der Bestände entlang der Wertschöpfungskette.“ ebd., S. 459. Für weitere Definitionen vgl. [Schö11], S. 14 und [GN06], S. 23.

²⁶ Enthaltenen Daten werden in Stamm- und Bewegungsdaten unterteilt. Stammdaten sind Daten, die im Produktionskontext länger unverändert bleiben und auftragsunabhängig sind, wie z. B. Kundenstammdaten. Bewegungsdaten erfassen Veränderungen, beispielsweise Lagerbestände. Siehe [Wann10], S. 557.

²⁷ Siehe [GT12], S. 331–338 sowie [KH02], S. 127–129. Eine bekannte Softwareimplementierung eines solchen ERP-Systems ist SAP R/3, das verschiedene Module für die Bereiche der Finanz- und Buchhaltung, des Personalwesens, des Einkaufs und Vertriebs sowie der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) anbietet. Vgl. [Wann10], S. 574–577.

Einsatz der verfügbaren Produktionsfaktoren und der wirtschaftliche Vollzug der Aufgabenerfüllung, die sich aus den Absatzmöglichkeiten für einen vorgegebenen Zeitraum ergeben.“²⁸ Dabei wird der „mengenmäßige und zeitliche Produktionsablauf für die vorliegenden Kundenaufträge unter Beachtung der verfügbaren Kapazitäten“²⁹ organisiert, was aufgrund der vorliegenden intra-organisatorischen Supply Chain standortübergreifend erfolgt. Das im Liefernetzwerk eingesetzte System basiert auf dem Manufacturing-Resource-Planning-Konzept (MRP-II), einem Stufenkonzept mit sukzessiver Top-Down-Planung³⁰, welches eine Erweiterung des Material Requirements Planning (MRP) darstellt. Der Ablauf der Planung erfolgt wie in Abbildung 2.3 dargestellt:

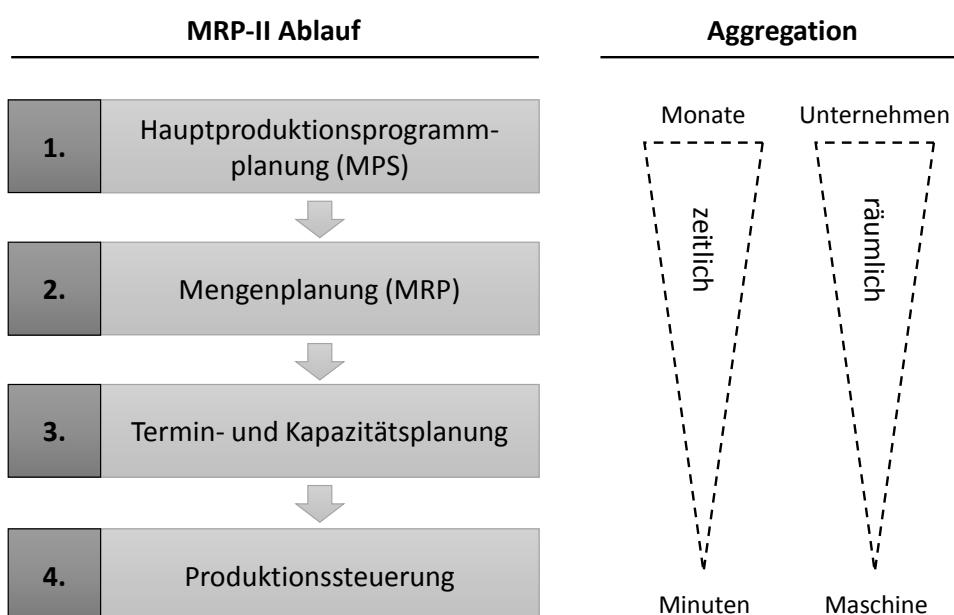


Abbildung 2.3: MRP-II-Konzept³¹

Die übergeordneten Stufen legen Rahmenbedingungen für die untergeordneten Stufen fest³². Die Hauptproduktionsprogrammplanung (auch Master Production Schedule, MPS genannt) legt die Primärbedarfsmengen für die Produkte fest, anhand derer die Mengenplanung (MRP) und anschließend die Termin- und Kapazitätsplanung durchgeführt wird.

²⁸ [Dang09], S. 9 f.

²⁹ [Wann10], S. 553–555.

³⁰ Siehe ebd. und [Temp06a], S. 277–279.

³¹ In Anlehnung an Grafiken aus [Thon10], S. 281, [Dang09], S. 1306 und [Temp06a], S. 278.

³² Für die Ausführungen zum MRP-II-Konzept siehe [GT12], S. 333–335, [Dang09], S. 1306–1312 und [Wann10], S. 560 ff. und [Thon10], S. 279–282. Für Details zum MRP-Ablauf siehe ebd., S. 306–309, [DW97], S. 296–346 und [Koet12], S. 36.

Das Ergebnis dieser drei Stufen ist ein durchführbarer Produktionsplan für das Liefernetzwerk, dessen Ausführung durch die Produktionssteuerung geregelt und überwacht wird³³.

Durch die Integration des MRP-Verfahrens³⁴ übernehmen moderne MRP-II-Module jedoch auch einige grundlegenden Schwächen des ursprünglichen Verfahrens, insbesondere dessen mangelnde Berücksichtigung von Unsicherheit, worauf in Kapitel 2.2.2.4 noch detaillierter eingegangen wird³⁵.

Die Steuerung des vorliegenden Liefernetzwerks wird zusätzlich noch durch Prinzipien wie Lean Production bzw. dem daraus entstandenen Lean-Supply-Chain-Management beeinflusst. Lean Production bedeutet „die Minimierung aller benötigten Ressourcen (einschließlich der Zeit) für die verschiedenen Tätigkeiten des Unternehmens. Sie identifiziert Verschwendungen³⁶ [...] und eliminiert sie“³⁷. Dazu wird die Produktion nach dem just-in-time (JIT) Prinzip organisiert, wobei „jedes Teil, jede Komponente und jedes Erzeugnis [...] in der geforderten Menge zur geforderten Zeit“³⁸ gefertigt wird. Ausgangspunkt ist eine Rückwärtsterminierung ohne Puffer vom Kundenauftrag aus³⁹. Krüger definiert eine Lean Supply Chain als „eine nach dem just-in-time Konzept gesteuerte Supply Chain“⁴⁰. Dementsprechend ist das im Liefernetzwerk praktizierte Lean-Supply-Chain-Management definiert als die Anwendung des Lean- bzw. JIT-Konzeptes auf die gesamte Supply Chain inklusive der Beschaffungs- und Distributionsprozesse. Durch die Vermeidung von Verschwendungen liegt der Fokus in vielen Unternehmen überwiegend auf der

³³ Dieser Planungsaufwand wird im vorliegenden Fall nur für hochpreisige Artikel durchgeführt. Bei einer ABC-Klassifizierung erfolgt eine exakte Bestandsführung und Planung also vorwiegend für Produkte der Kategorien A und B, die wertmäßig günstigeren C-Teile werden stattdessen durch einfache Dispositionsverfahren gesteuert. Vgl. [GT12], S. 184–186 und [Bich10], S. 83–88. Für weitere Informationen zum C-Teile-Management vgl. [AIK+08], S. 289–293.

³⁴ Für eine Darstellung der Weiterentwicklung von ERP-Systemen vgl. [HS10], S. 846.

³⁵ Siehe [KSL06], S. 626. Für eine Diskussion weiterer Kritikpunkte vgl. [Alic05], S. 17–19. Aus diesem Grund wurden Advanced-Planning-Systeme (APS) als Erweiterung der ERP-Systeme entwickelt. Diese Systeme, die aus dem Gedanken der Betrachtung der gesamten Supply Chain entstanden sind, enthalten verschiedene Planungsmodule, die unter anderem Schwächen der bisher vorhandenen Verfahren ausgleichen. Sie sind aber bezüglich des Anwendungszwecks bisher nur auf wenige spezifische Fälle spezialisiert. Vgl. dazu [Wann10], S. 578, [SK05], S. 109–115 und [Temp06a], S. 373–377. Arnold et al. bezeichnen diese auch als PPS-Systeme der 4. Generation, weswegen im Weiteren der Begriff PPS-System genutzt wird. Siehe [AIK+08], S. 342.

³⁶ Durch den japanischen Ursprung wird Verschwendungen in diesem Zusammenhang als „muda“ bezeichnet. Gemeint sind damit alle aus Kundenperspektive nicht wertschöpfenden Tätigkeiten in der Supply Chain. Siehe [Schö11], S. 321.

³⁷ Ebd., S. 322 mit Verweis auf [Blac10]. Für weitere Details vgl. [Krüg04], S. 47 ff.

³⁸ [Dang09], S. 1300 f.

³⁹ Vgl. [ICZ+13], S. 1571.

⁴⁰ [Krüg04], S. 52.

Reduktion von überflüssigen Beständen⁴¹. Dadurch existieren auch im betrachteten Szenario keine überflüssigen Zeit- oder Mengenpuffer. Dies führt bei einer Abweichung vom ursprünglichen Produktionsplan aufgrund unvorhergesehener Ereignisse zwangsläufig zu einer Verschiebung der geplanten Termine und somit zu negativen Auswirkungen auf die Liefertreue.

2.1.3 Projekteigenschaften

Durch die kundenindividuelle Fertigung entsteht zwischen dem betrachteten Produzenten und dessen Kunden ein Verhältnis mit Projektcharakter⁴². Auf das Beispiel der Schienenfahrzeug-Industrie bezogen, bedeuten Projekte die Produktion einer neuen Zugreihe, für die initial einige Produkte und Komponenten neu entwickelt werden müssen⁴³. Jedes Projekt löst also nach der Konstruktionsphase mindestens einen Auftrag aus. Die Aufträge können anhand ihrer Logistikanforderungen⁴⁴ weiter unterschieden werden in Standardlieferungen und Lieferungen mit erweiterten logistischen Zusatzleistungen.

2.1.3.1 Standardlieferungen

Der überwiegende Anteil der Aufträge im betrachteten Liefernetzwerk entspricht Standardlieferungen. Diese enthalten jeweils eine Liste mit einer oder mehreren Auftragspositionen in der Mengeneinheit 1 oder größer. Der erste Auftrag enthält oft Produkte, die durch ETO entstanden sind. Für weitere Aufträge im Projekt werden diese Komponenten dann nach dem MTO-Prinzip produziert. Die Auftragspositionen können dabei sowohl

⁴¹ Siehe [SF10], S. 87.

⁴² Nach DIN 69901-5 ist ein Projekt definiert als ein „Vorhaben, das im Wesentlichen durch Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist“ [DIN09], wobei Zielvorgaben, zeitliche, finanzielle oder andere Begrenzungen bzw. projektspezifische Organisation gegeben sind. Schröder definiert ein Projekt als „jede Aufgabe [...], die einen definierbaren Anfang und ein definierbares Ende besitzt, die den Einsatz mehrerer Produktionsfaktoren für jeden der einzelnen, miteinander verbundenen und wechselseitig voneinander abhängigen Teiltätigkeiten erfordert, die ausgeführt werden müssen, um das dieser Aufgabe vorgegebene Ziel zu erreichen.“ [Schr70], S. 17, entnommen aus [Litk07], S. 19.

⁴³ Entwicklungsprojekte haben in diesem Zusammenhang als Ziel die Neuentwicklung eines physischen Produktes. Dies kommt auch der Projektdefinition nach PRINCE2 nahe, für die Projekte den Zweck der Auslieferung eines oder mehrerer Produkte haben. Siehe [HHF10], S. 2. Vgl. auch [Zell13], S. 7.

⁴⁴ Vorgaben über Termine, Orte und die Form der Liefermengen, die bereitzustellen oder abzuholen sind. Siehe [Schö11], S. 17 f. und [Gude10], S. 44 f.

eigengefertigte Komponenten als auch Kaufteile enthalten. Da durch die Breite des Produktspektrums die Einkaufsvolumina je Kaufteil entsprechend gering ausfallen, werden diese vorwiegend über Single-Sourcing-Strategien bezogen⁴⁵.

Durch die kundenindividuelle Konstruktion werden diese Aufträge mit ausreichend langer Vorlaufzeit vergeben, sodass die Priorität auf der Einhaltung des versprochenen Liefertermins liegt, was dem in Kapitel 2.2.1 detaillierter beschriebenen Ziel der Liefertreue entspricht.

Standardlieferungen enthalten in der Regel keine speziellen Logistikanforderungen, weshalb die Lieferung der Auftragspositionen nicht zusammenhängend erfolgen muss und Teillieferungen je Position erlaubt sind.

2.1.3.2 Logistische Zusatzleistungen: Komplettlieferungen & Kitting

Neben den eigentlichen Produkten werden vermehrt Leistungen mit Dienstleistungsscharakter – sogenannte Value-Added-Services (VAS) – nachgefragt, die die verkauften Produkte, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, ergänzen.

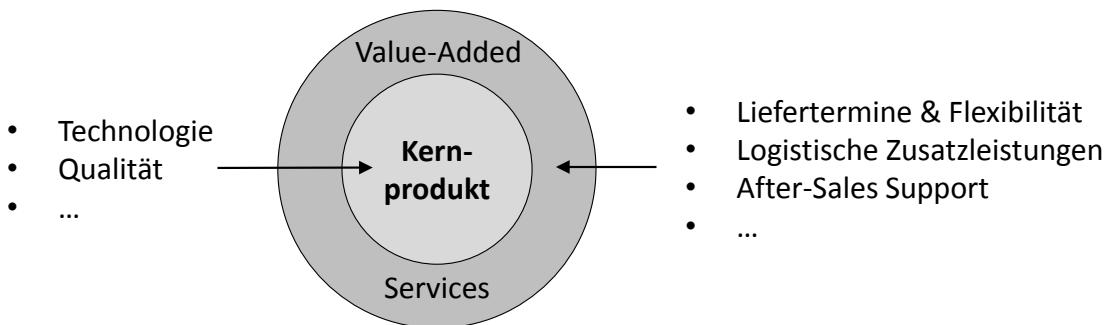


Abbildung 2.4: Value-Added-Services im Kontext⁴⁶

Dabei stellen in der produzierenden Industrie die Produkte das Kernprodukt und damit die Primärleistung eines Unternehmens dar und die VAS sind ergänzende Sekundärleistungen, die dem Kunden einen Mehrwert bieten⁴⁷.

⁴⁵ „Unter Single Sourcing versteht man die Konzentration auf eine Beschaffungsquelle. Das Unternehmen bezieht ein bestimmtes Einkaufsteil oder eine Dienstleistung von lediglich einem einzigen [...] Lieferanten.“ [Bich10], S. 35.

⁴⁶ In Anlehnung an [Chri05], S. 53 ff.

⁴⁷ Definition und Einsatzgründe siehe [MBK12], S. 450 und [Bruh10], S. 155. Dabei sind die Value-Added-Services der Wettbewerbsvorteil des Lieferanten im Markt, da durch den Zusatznutzen die Kundenzufriedenheit und die langfristige Kundenbindung gefördert wird.

Ein wichtiger Teilbereich der VAS sind logistische Zusatzleistungen (LZL)⁴⁸. Corsten und Gössinger definieren diese als Transformationsprozess, der temporale und lokale Eigenschaften des Produkts verändert⁴⁹. Nach SAP-Definition sind logistische Zusatzleistungen „ein Vorgang, der an Materialen durchgeführt wird, um ihren Wert und ihren Nutzen zu erhöhen sowie ihre Funktionen zu erweitern“⁵⁰.

In diesen Rahmen lassen sich auch die ursprünglich in der Automobilindustrie entstandenen Leistungen Komplettlieferungen und Kitting einordnen. Beide Leistungen werden aufgrund der Stellung des betrachteten Zulieferers als Systemlieferant⁵¹ vermehrt durch die Kunden als logistische Zusatzleistungen nachgefragt.

Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass bei Komplettlieferungs- und Kitting-Aufträgen nicht nur einzelne Positionen unabhängig voneinander geliefert werden, sondern mehrere Auftragspositionen gebündelt in einer Lieferung⁵². Diese werden dann als komplettes Subsystem⁵³ in die Endkunden-Produkte eingebaut, wodurch sich spezifische Anforderungen an die Liefergenauigkeit ergeben⁵⁴. Zur Gewährleistung der Störungsfreiheit der Kundenproduktion darf kein Teil der Bestellung fehlen. Um Kosten zu senken, sind dabei keine Teillieferungen erlaubt⁵⁵, deshalb darf weder ein Auftragssplit der enthaltenen Auftragspositionen noch ein Mengensplit je Position erfolgen⁵⁶.

Solche vollständigen Lieferungen werden als Komplettlieferung bezeichnet⁵⁷. Werden diese zusätzlich unter einer übergeordneten Sachnummer zusammengefasst, spricht man

⁴⁸ VAS können nach dem Grad ihrer inhaltlichen Affinität zur Primärleistung kategorisiert werden. Im weiteren Verlauf werden die logistischen Zusatzleistungen, die eine hohe Affinität aufweisen, betrachtet. Für weitere Leistungen und mögliche Einordnungen siehe [MBK12], S. 450 f.

⁴⁹ Vgl. [CG06], S. 117, die dafür den Begriff „logistische Leistungserstellung“ verwenden. Als Beispiele für relevante Leistungsarten werden Transport, Lagerung, Umschlag sowie auftragsorientierte und ressourcenorientierte Bündelung aufgeführt.

⁵⁰ [SAP13f-ol]. Dabei werden nach SAP logistische Zusatzleistungen durch Lagermitarbeiter ausgeführt. Einige weitere genannte Beispiele für LZL sind das Anbringen von Tags, Etikettierung und Schrumpfverpacken.

⁵¹ So bezeichnet man A-Lieferanten, die Arbeitsaufträge in größerem Umfang erhalten und dabei eine hohe „Eigenverantwortung im Bereich der Entwicklung von Produkt-Know-how und der Erarbeitung von neuen Problemlösungen“ ([Wann10], S. 131) übertragen bekommen.

⁵² Auch auftragsorientierten Bündelung genannt. Dabei werden „unterschiedliche logistische Einzelobjekte [...] nach Vorgaben aus Kundenaufträgen zusammengefasst“ [CG06], S. 118.

⁵³ Vgl. [KH02], S. 9. Beispiel: Lieferung kompletter Front-Ends in der Automobilindustrie.

⁵⁴ „Durch die Liefergenauigkeit wird angegeben, inwieweit die bestellten Produkte in gewünschter Art und Menge ausgeliefert werden.“ [Pfoh10], S. 37.

⁵⁵ Vgl. [Larg08], S. 243.

⁵⁶ Vgl. [Alic05], S. 95.

⁵⁷ Siehe [Gude12], S. 32.

von Kitting⁵⁸. Zu jeder Kitsachnummer existieren Informationen über die Kit-Struktur, die definiert, welche Produkte und Komponenten in welcher Menge enthalten sind.

Der Einsatz von Komplettlieferungen und Kits führt zu mehreren Vorteilen⁵⁹:

- **Platzbedarf:** Es wird nur der Platz für eine übergeordnete Verpackung bzw. den Kitcontainer benötigt, anstatt mehreren Transportcontainern für jede Position bei Einzelbelieferung. Dies wirkt sich insbesondere im Montagebereich positiv aus.
- **Qualität:** Spezifisch auf die enthaltenen Positionen angepasste Verpackungen⁶⁰ können diese besser vor Schäden schützen. Zusätzlich wird das allgemeine Risiko von Transportschäden durch die Bündelung reduziert. Packanweisungen können Verwechslungen zwischen ähnlichen Komponenten vermeiden, wobei die Entnahmereihenfolge entsprechend der Montagereihenfolge festgelegt werden kann.
- **Handhabung:** Verringelter Aufwand und Kosten durch weniger Teilenummern bei Kits und weniger Warenbewegungen (zum Beispiel im Bestellprozess oder Wareneingang). Schnellere Bearbeitung von Produktionsaufträgen, da die Suche und das Zusammenstellen von benötigten Teilen während der Montage entfallen. Zusätzlich wird bei kleinen Losgrößen der Produktwechsel in der Fertigung erleichtert, da die benötigten Teile schneller bereitgestellt werden können.
- **Verständnis:** Gebündelte Lieferungen in der Montage erleichtern die Einweisung neuer Mitarbeiter und können je nach Aufbau auch direkt als Anleitung dienen. Zusätzlich lassen sich komplexe Produkte besser verstehen und auf Vollständigkeit überprüfen.

Gleichzeitig ergeben sich folgende Nachteile⁶¹:

- Die **Zusammenstellung** von Komplettlieferungen und Kits ist zeit- und arbeitsintensiv, obwohl dabei kein direkter Mehrwert am eigentlichen Produkt entsteht. Des Weiteren werden für die Zusammenstellung und Lagerung zusätzliche Flächen benötigt.

⁵⁸ [BM92], S. 3. Kits können dabei anhand ihres Einsatzzweckes unterschieden werden. Wird ein Kit unternehmensintern zusammengestellt und in der eigenen Produktion eingesetzt, so spricht man von Kit-to-assembly, wird ein Kit für einen Kunden zusammengestellt, von Kit-to-customer. Im Weiteren wird mit dem Begriff Kit nur noch auf das Kit-to-customer-Verfahren Bezug genommen. Bei diesem sind die logistischen Anforderungen hinsichtlich der Liefergenauigkeit identisch mit denen der Komplettlieferungen. Für weiterführende Erläuterungen zum Kit-to-assembly-Verfahren vgl. [Hans12] und [Limè11]. Zum Kit-to-customer-Verfahren vgl. auch [RD05], S. 450, wo diese Form des Kittings als „subcontracting practice“, sprich der Auslagerung der Kiterstellung an Unterfirmen bzw. Zulieferer, definiert ist.

⁵⁹ Vgl. [BM92], [CF11], [Medb03] und [CMH+02].

⁶⁰ Neben Standard-Einwegverpackungen werden auch kundenspezifische Mehrwegverpackungen eingesetzt. Vgl. [Koet12], S. 165.

⁶¹ Siehe [BM92], S. 5 f.

- **Beschädigte Teile oder Fehlteile** verursachen Effizienzeinbußen sowohl bei der Zusammenstellung als auch bei der späteren Entdeckung von Fehlteilen im Verbrauch. Dies kann bis hin zu Produktionsstillständen führen.

Werden für einen Komplettlieferungs- oder Kitting-Auftrag⁶² die Produkte an verschiedenen Standorten hergestellt oder beschafft, so muss vor der vollständigen Auslieferung die Bündelung in einem Konsolidierungslager erfolgen⁶³. Aufgrund der benötigten Lagerflächen werden dazu üblicherweise wenige zentrale Lagerorte, wie beispielsweise das Warenausgangslager vom Werk der Produktgruppe B1, als allgemeine Konsolidierungslagerorte festgelegt.

2.1.3.2.1 Auswirkungen von Komplettlieferungen und Kits auf die Projekteigenschaften
Die Möglichkeit des direkten Einsatzes von Komplettlieferungen und Kits am Montage- bzw. Produktionsort führt in Kombination mit dem Prinzip der Lean Production zur weiteren Logistikanforderung der just-in-time-Lieferung an die Endkunden. Durch die verbrauchssynchrone Anlieferung werden die insgesamt notwendigen Pufferbestände weiter reduziert⁶⁴.

Aufgrund der Stellung als Systemlieferant und die JIT-Anforderung werden für Projekte mit Komplettlieferungs- und Kitting-Aufträgen langfristige Basis- bzw. Sukzessiv-Lieferverträge⁶⁵ abgeschlossen, um die Versorgung der Kundenproduktion sicherzustellen⁶⁶. Da Planung und Steuerung auf Kundenseite nach Bedarf erfolgen, sind aufgrund der langfristigen Projektzeiträume Lieferzeitpunkte und Abnahmemengen frühzeitig bekannt und festgelegt⁶⁷. Dies führt in Kombination mit der JIT-Anlieferung dazu, dass die Einhaltung der Lieferversprechen eine hohe Priorität bei den Kunden hat, was durch die Kennzahl der Liefertreue quantifiziert werden kann⁶⁸.

⁶² Im weiteren Verlauf wird davon ausgegangen, dass die betrachteten Kits im Liefernetzwerk analog zu den Komplettlieferungen durch die Konsolidierung vor der Auslieferung erstellt werden. ERP-Systeme bieten mehrere Möglichkeiten, um Kits abzubilden. Dabei können auch Fertigungsstücklisten verwendet werden. Da jedoch Liefernetzwerke mit räumlich verteilter Produktion betrachtet werden und die reine Konsolidierung keine wertschöpfende Montagetätigkeit darstellt, wird diese Kitting-Variante im weiteren Verlauf nicht weiter berücksichtigt.

⁶³ Pfohl bezeichnet dies als Konzentrationspunkt [Pföh10], S. 6 f.

⁶⁴ Siehe [Koet12], S. 72 f.

⁶⁵ Siehe [Wann10], S. 138 und [Larg08], S. 209–212.

⁶⁶ Siehe [Koet12], S. 75 und [AIK+08], S. 281.

⁶⁷ Im Gegensatz zum häufig in der Automobilindustrie eingesetzten Abrufvertrag, in dem zwar die Gesamtmengen für einen Zeitraum festgelegt sind, aber die genauen Lieferzeitpunkte und Abnahmemengen erst kurzfristig bestimmt werden. Siehe [Larg08], S. 209.

⁶⁸ Vgl. empirische Studienergebnisse in [GPM04], S. 342., sowie [Melz07], S. 175

2.2 Anforderungsbeschreibung

Die Planung und operative Durchführung der Projekte im Netzwerk unterliegen den nachfolgend beschriebenen Zielsetzungen und Einschränkungen.

2.2.1 Zielvorgabe Liefertreue

Um das Erfolgspotenzial der Kundenzufriedenheit als Gesamtziel, anhand dessen der Wertschöpfungsprozess⁶⁹ gesteuert wird, zu maximieren, empfehlen Van Hoek, Lee und Billington⁷⁰ kundenzufriedenheitsbezogene Kennzahlen zur Leistungsevaluierung der Supply Chain. Die Erfassung der Kundenzufriedenheit durch quantifizierbare Werte kann jedoch nur indirekt erfolgen. Herold definiert diese als Funktion aus mehreren Inputfaktoren⁷¹:

$$\begin{aligned} \text{Kundenzufriedenheit} = \\ f(\text{Preis, Qualität, Funktionalität, Design, ... , Service}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Dreher⁷², der die Kundenzufriedenheit anhand des Verhältnisses von Attraktivität zu Kosten definiert:

$$\text{Kundenzufriedenheit} = f\left(\text{Kundennutzen} = \frac{\text{Attraktivität}}{\text{Kosten}}\right) \quad (2.2)$$

Dabei wird Attraktivität seiner Ansicht nach maßgebend durch den Lieferservice⁷³ bestimmt, welcher aus der Kombination Liefertreue und Lieferzeit entsteht. Diese Einschätzung spiegelt sich auch in empirischen Studien wider, in denen der Lieferservice als wichtigstes Evaluierungskriterium für Lieferanten genannt wird, wobei die Liefertreue den größten Einfluss ausübt⁷⁴. Das ist neben den Auswirkungen der schon beschriebenen langfristigen Kontrakte und den logistischen Zusatzleistungen ein weiterer Grund, aus dem die Liefertreue im betrachteten Liefernetzwerk als maßgeblicher und quantifizierbarer Einflussfaktor auf die Kundenzufriedenheit angesehen wird⁷⁵.

⁶⁹ Siehe [Hero05], S. 2 und [GPM04], S. 338.

⁷⁰ [Hoek01] und [LB92].

⁷¹ [Hero05], S. 7.

⁷² [Dreh97], S. 39.

⁷³ Für eine detaillierte Aufschlüsselung des Begriffs Lieferservice siehe [AIK+08], S. 450 f.

⁷⁴ Siehe [GPM04], S. 342 und [SHN12], S. 403.

⁷⁵ Siehe [Melz07], S. 175. Für weitere Gründe vgl. auch [Hero05], S. 15. und [Hopp08], S. 347 f.

Für die Definition der Liefertreue wird die zeitliche Durchführung eines Kundenauftrags mit den folgenden Eckdaten bewertet:

1. **Auftragseingang:** Termin, zu dem der Auftrag eingeht.
2. **Kundenwunschtermin:** Termin, zu dem der Kunde beliefert werden möchte.
3. **Zugesagter Liefertermin:** Termin, zu dem der Lieferant dem Kunden die Lieferung nach interner Abstimmung zusagt.
4. **Auftragserfüllung:** Termin, zu dem die tatsächliche Lieferung an den Kunden durchgeführt wurde.

Anhand dieser Termine können die in Abbildung 2.5 dargestellten Kennzahlen definiert werden.

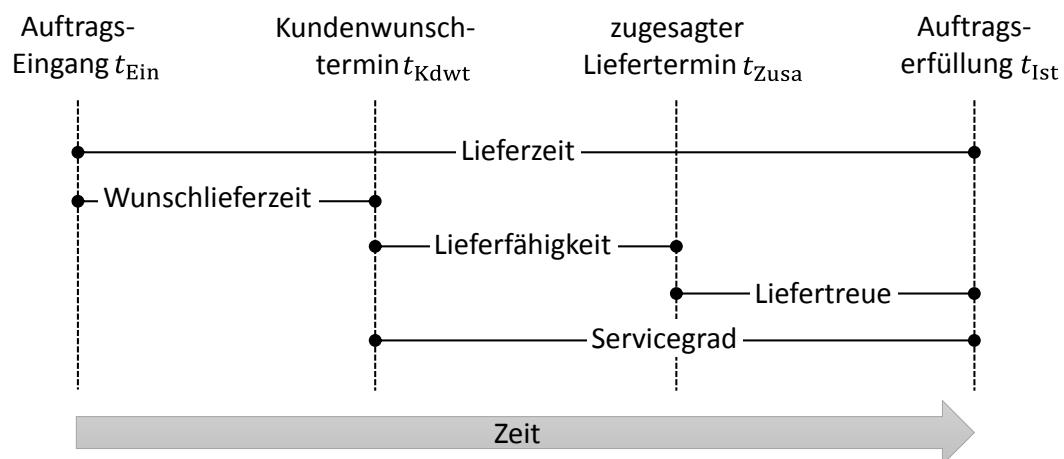


Abbildung 2.5: Liefertreue im Kontext⁷⁶

Die Zeitspanne zwischen Auftragseingang und Auftragserfüllung wird als Lieferzeit definiert, welche wiederum in Wunschlieferzeit und Servicegrad unterteilt wird. Dabei gibt die Wunschlieferzeit die Vorlaufzeit an, mit der der Kunde den Auftrag erteilt. Der Servicegrad⁷⁷ vereint die Kennzahlen Lieferfähigkeit und Liefertreue. Durch die Lieferfähigkeit werden die Termindifferenzen zwischen Kundenwunschtermin und zugesagtem

⁷⁶ In Anlehnung an ebd., S. 347 und [GHI+10], S. 453.

⁷⁷ Während Lieferzeit und Liefertreue die relevanten Kennzahlen für Auftragsfertiger sind, wird der Begriff Servicegrad häufig im Kontext der Lagerfertigung verwendet (siehe [Lödd05], S. 19), wobei die gängigsten Definitionen in diesem Bereich drei Typen von Servicegraden erfassen [Temp06b], S. 27–30: Der α -Servicegrad ist ereignisorientiert und gibt die „Wahrscheinlichkeit dafür an, dass ein eintreffender Bedarf vollständig aus dem bei seiner Ankunft vorhandenen physischen Lagerbestand erfüllt werden kann.“ Der mengenorientierte β -Servicegrad gibt den „Anteil der Gesamtnachfrage an, der ohne eine lagerbedingte Lieferzeit ausgeliefert werden kann.“ Der γ -Servicegrad ist zeit- und mengenorientiert und erfasst „sowohl die Höhe der Fehlmenge als auch die jeweiligen Wartezeiten der als Rückstandsaufträge vorgemerkteten Bedarfe.“

Liefertermin erfasst, wodurch diese vorwiegend für kurzfristig eingeplante Aufträge relevant ist.

Zur Messung der Liefertreue wird zunächst, wie in Formel (2.3) dargestellt, die Lieferterminabweichung LTA für jede Auftragsposition gemessen⁷⁸:

$$LTA = t_{\text{Ist}} - t_{\text{Zusa}} \quad (2.3)$$

Die Lieferterminabweichung ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Ist-Liefertermin (Auftragserfüllung) t_{Ist} und dem Plan-Liefertermin (zugesagter Liefertermin) t_{Zusa} . Dabei gilt eine Position erst als geliefert, wenn die vom Kunden bestellte Gesamtmenge ausgeliefert wurde⁷⁹. Eine positive Lieferterminabweichung entspricht somit einer Verspätung, ein negativer Wert einer Vorablieferung. Die geläufigste Art der Erhebung der Liefertreue LT enthält ein Liefertreuefenster, innerhalb dessen die Liefertreue dann „den prozentualen Anteil der innerhalb einer definierten Liefertermintoleranz gelieferten Aufträge“⁸⁰ bezeichnet.

$$LT = \frac{\text{AnzAuf mit } LTA_{\text{UG}} \leq LTA \leq LTA_{\text{OG}}}{\text{AnzAuf}} \times 100 \quad (2.4)$$

Wie in Formel (2.4) erkennbar, wird die Anzahl der liefertreuen Aufträge AnzAuf im betrachteten Zeithorizont durch Ober- und Untergrenzen für die Abweichung eingeschränkt. Dabei geben LTA_{UG} das früheste vom Kunden akzeptierte Lieferdatum und LTA_{OG} das späteste akzeptierte Lieferdatum an⁸¹. Abbildung 2.6 stellt dies exemplarisch für eine Liefertreue von 65% innerhalb des Erhebungszeitraums dar:

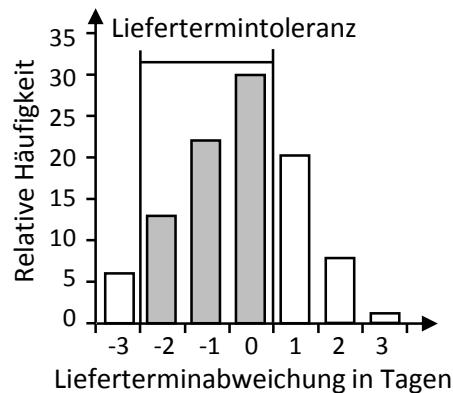


Abbildung 2.6: Beispiel für eine 65%-Liefertreue⁸²

⁷⁸ Definition und Formeln siehe [Lödd05], S. 24 f.

⁷⁹ Vgl. Abschnitt zu Teillieferungen in [Melz07], S. 173.

⁸⁰ [Lödd05], S. 24 f.

⁸¹ Siehe [GN06], S. 25.

⁸² [Lödd05], S. 25 und vgl. [GN06], S. 25.

Erreicht der Lieferant keine akzeptable Liefertreue aus Kundensicht, wirkt sich dies in mehreren Bereichen negativ aus⁸³. Dazu zählt insbesondere das Vertrauensverhältnis zum Kunden, da der Lieferant als unzuverlässig wahrgenommen wird und die Kundenzufriedenheit sinkt. Die Konsequenzen reichen von der Schwächung der Verhandlungsposition bei Folgeaufträgen bis zum vollständigen Verlust des Kunden⁸⁴. Verspätete Lieferungen können auch indirekte Folgekosten nach sich ziehen, wenn sie beispielsweise in Form von Auslastungsverlusten oder Produktionsstillständen zu Verzögerungen bei den Kunden führen. Dabei sind die hier betrachteten Liefernetzwerke mit just-in-time-Anforderungen und Lean-Produktionskonzepten besonders anfällig. Als direkte Folgekosten werden deswegen zur Absicherung oft Strafkosten für unpünktliche Lieferungen mit in die Vertragsbedingungen aufgenommen⁸⁵. Zusätzlich schützen sich die meisten Kunden durch einen eigenen Sicherheitsbestand gegen Lieferuntreue. Wird durch die verspätete Lieferung auch die Liefertreue des Kunden beeinflusst, treten alle zuvor genannten Nachteile erneut unternehmensübergreifend auf.

2.2.1.1 Liefertreue im Projekt- und Liefernetzwerk-Kontext

Im betrachteten Liefernetzwerk können normale Aufträge ohne besondere Logistikanforderungen, trotz der hohen Abhängigkeit von der Lieferzuverlässigkeit der Lieferanten durch Single Sourcing⁸⁶ und der geringen Fehlertoleranzen durch das Lean-Supply-Chain-Management zufriedenstellend durchgeführt werden.

Die Auswirkungen der logistischen Zusatzleistungen Kitting und Komplettlieferungen auf die Liefertreue sind jedoch problematisch. Durch die erforderliche Zusammenführung der Positionen und Bedingung der vollständigen Lieferung ist „die Wahrscheinlichkeit,

⁸³ Für den folgenden Abschnitt siehe Aufzählung in [Lödd05], S. 26 und [Wann10], S. 36.

⁸⁴ Siehe [Larg08], S. 259 und S. 267. Vgl. auch Opportunitätskosten in [Schö11], S. 54.

⁸⁵ Siehe [GN06], S. 25., [Wann10], S. 298 f.

⁸⁶ Melzer-Ridinger stellt fest, dass durch das Single Sourcing die Liefertreue weniger von den eigenen Resourcen, sondern vermehrt durch die Lieferanten beeinflusst wird. [Melz07], S. 176.

dass der Kunde eine vollständige Lieferung erhält, [...] erheblich geringer als der Lieferbereitschaftsgrad⁸⁷ der einzelnen Auftragspositionen. Die Auftragsliefertreue für Mehrpositionsaufräge ist gleich dem Produkt der Lieferbereitschaftsgrade⁸⁸. Dies führt insbesondere bei größeren Kits oder Komplettlieferungen zu einer erheblichen Verschlechterung der Liefertreue, was in einem Beispiel in Tabelle 2.1 verdeutlicht wird.

Tabelle 2.1: Auftragsliefertreue für einen vollständigen Auftrag⁸⁹

Produktliefertreue		Auftragsliefertreue
Produkt 1	80%	
Produkt 2	98%	$80\% \times 98\% \times 90\% = 71\%$
Produkt 3	90%	

Das Ausmaß der negativen Auswirkungen der Konsolidierung auf die Liefertreue wird durch die just-in-time-Anforderungen nochmals potenziert, da diese das vom Kunden akzeptierte Liefertreuefenster reduzieren⁹⁰. Abbildung 2.7 stellt die Auswirkungen der Kombination beider Anforderungen grafisch dar.

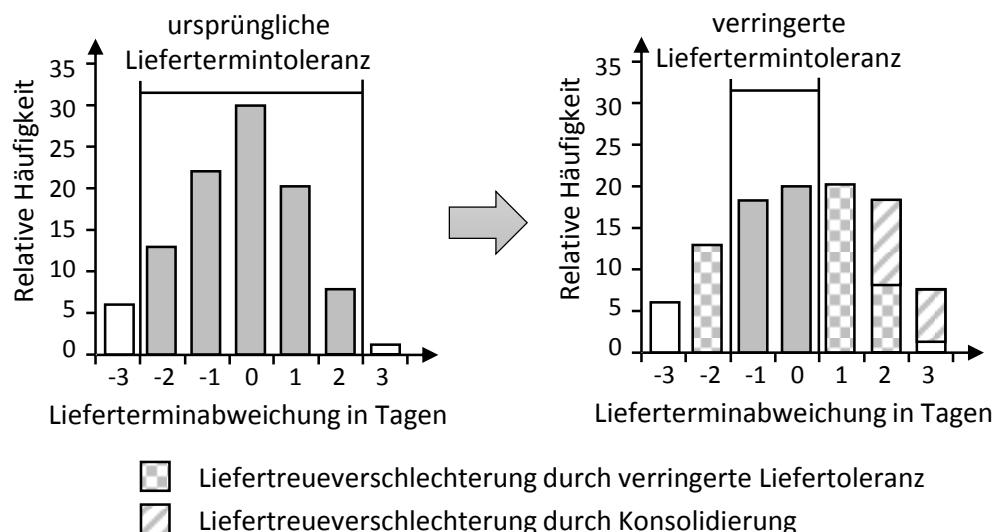


Abbildung 2.7: Liefertreue von Komplettlieferungen und Kits

⁸⁷ Schönleben definiert den Lieferbereitschaftsgrad als Anzahl der zum gewünschten Liefertermin (Kundenwünschtermin) gelieferten Sachverhalte geteilt durch die Anzahl der bestellten Sachverhalte [Schö11], S. 54. Im folgenden Beispiel wird dieser analog zur Liefertreue der jeweiligen Artikel verwendet.

⁸⁸ [Melz07], S. 174. Vgl. auch [Gude10], S. 352 und [DAV10], S. 5773. Im Kontext der Anforderungen des betrachteten Liefernetzwerks entspricht der Lieferbereitschaftsgrad der Liefertreue der Materialien.

⁸⁹ Aus [Melz07], S. 174. Vgl. auch Tabelle in [Chri05], S. 77.

⁹⁰ Vgl. [Gude10], S. 232 f.

Das Liefertreuefenster wird durch die JIT-Anforderungen verkleinert, wodurch zuvor pünktliche Lieferungen unpünktlich werden (grau kariert). Durch die Konsolidierung und das dadurch notwendige Warten auf die jeweils letzte Auftragsposition verschiebt sich die Liefertterminabweichung insgesamt nach rechts (grau gestreift).

Aufgrund dieser Problematik ist das vorrangige Ziel im gegebenen Liefernetzwerk die Maximierung der Liefertreue für Komplettlieferungen und Kits, ohne dabei die Liefertreue der regulären Lieferungen zu verschlechtern.

2.2.1.2 Mehrziel-Berücksichtigung

Durch die Existenz mehrerer Projekte mit verschiedenen Aufträgen, für die jeweils die Liefertreue individuell gemessen wird, ergibt sich die Anforderung der Mehrziel-Berücksichtigung an Planungsverfahren im Liefernetzwerk. Solche Verfahren können allgemein nach ihrer zeitlichen Reichweite in drei Ebenen unterteilt werden:⁹¹

1. **Strategische Planung:** Langfristig über mehrere Jahre orientiert und bedacht auf Wahrung und Erschließung von Erfolgspotenzialen.
2. **Taktische Planung:** Mittelfristig von einigen Monaten bis zu wenigen Jahren orientiert. Konkrete Ausgestaltung der Strukturen und Organisation anhand der strategisch vorgegebenen Richtungen.
3. **Operative Planung:** Detailliertere Planung auf kurzfristiger Basis. Orientiert sich an den Rahmenbedingungen der taktischen Ebene.

Im Rahmen der taktischen Planung werden langfristig zu erreichende Zielvorgaben definiert, beispielsweise eine Vorgabe für die im Jahresmittel zu erreichende Liefertreue. Die operative Planung versucht dann, diese Ziele zu erreichen⁹².

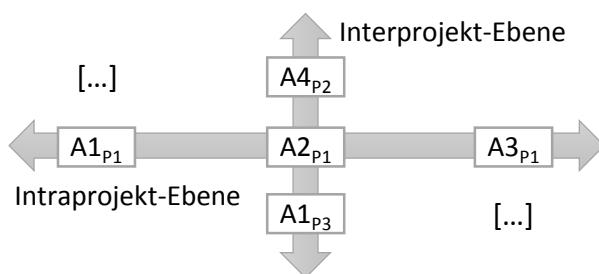


Abbildung 2.8: Auftrags-Interdependenzen

⁹¹ Siehe [GT12], S. 27 und [DS05], S. 28 f.

⁹² Vgl. [Deli13], S. 13 und [GT12], S. 32 f.

Die zu berücksichtigenden Interdependenzen zwischen den gleichzeitig ablaufenden Projekten (siehe Abbildung 2.8) können in zwei Ebenen unterteilt werden:

- **Intraprojekt-bezogen** erfolgt eine zeitlich-horizontale Betrachtung mehrerer Aufträge innerhalb eines Projektes. Auf der Aggregationsebene des Projektes soll dabei die taktische Zielvorgabe langfristig eingehalten werden. Dies trifft insbesondere auf regelmäßig wiederkehrende Aufträge wie Komplettlieferungen und Kits zu. Ist die Liefertreue permanent – sprich in mehreren aufeinanderfolgenden Lieferungen – unzureichend, so wird dies wesentlich gravierender und negativer vom Kunden empfunden als nur sporadische Verfehlungen des Liefertreueziels⁹³. Da es in der initialen Konstruktionsphase oft zu Produktänderungen kommt, werden Verfehlungen der Liefertreue während eines Projektanlaufs eher toleriert als in den späteren Projektphasen.
- **Interprojekt-bezogen** erfolgt die vertikale Betrachtung der Interdependenzen zwischen verschiedenen Aufträgen bzw. Projekten. Dabei entstehen durch die Konkurrenz um knappe Ressourcen⁹⁴ Zielkonflikte, bei denen individuelle Zielwerte nur noch verbessert werden können, indem andere Zielwerte sinken⁹⁵. Zur Auflösung dieser Zielkonflikte wird oft eine Zielgewichtung auf strategischer oder taktischer Ebene festgelegt⁹⁶. Im weiteren Verlauf wird davon ausgegangen, dass alle projektspezifischen Liefertreueziele gleichmäßig gewichtet werden. Trotzdem ist in manchen Situationen eine Priorisierung der Projekte bzw. Aufträge notwendig. Dies kann beispielsweise bei Aufträgen mit besonders hohen Folgekosten durch Pönalen oder Großprojekten für Key-Account-Kunden⁹⁷ der Fall sein.

⁹³ Vgl. dazu den Abschnitt „Attribution theory: attribution of stability“ in [DR02], S. 122. sowie den Abschnitt zum „Service Recovery Paradox“ in [SB98], S. 25.

⁹⁴ Siehe Nebenbedingungen im nächsten Abschnitt.

⁹⁵ Diese Zielkonflikte können nicht nur zwischen den Liefertreuezielen der einzelnen Aufträge entstehen. Ein klassischer Zielkonflikt der Produktion besteht z. B. zwischen der Steigerung der Teileverfügbarkeit und der Senkung der Kapitalbindung im Lager. Vgl. [Gude10], S. 77 f., [Wann10], S. 23.

⁹⁶ Vgl. [Schö11], S. 37.

⁹⁷ Wichtige Großkunden, siehe [Hopp08], S. 348.

2.2.2 Nebenbedingungen

Die Einschränkungen für Planungsverfahren zur Optimierung der Liefertreue-Zielwerte der Aufträge ergeben sich zum einen aus der interprojekt-bezogenen Konkurrenz um die begrenzten Ressourcen. Zum anderen muss der Faktor der Unsicherheit in der Planung adäquat berücksichtigt werden.

2.2.2.1 Material-Restriktionen

Durch die in Kapitel 2.1 beschriebene Struktur und Steuerung des Liefernetzwerks nach Lean- und JIT-Prinzipien werden bei der Fertigung eines Produkts die benötigten Rohmaterialien und Komponenten exakt passend beschafft und gefertigt. Es existieren dementsprechend keine zusätzlichen Bestände oder Pufferzeiten. Diese Netzwerke sind besonders anfällig für das Auftreten von Fehlteilen⁹⁸. Dabei liegt nach Thun et al. ein Fehlteil dann vor, „wenn ein Teil zum [...] benötigten Zeitpunkt nicht in der erforderlichen Qualität am richtigen, d.h. unmittelbaren Verbrauchsort vorhanden ist“⁹⁹. Bezüglich des Ursprungs der Fehlteile unterscheiden die Autoren zwischen internen und externen Ursprüngen. Bei internen Ursachen treten Fehler, wie zum Beispiel Maschinenausfälle, Qualitätsprobleme oder Fehlbestände, innerhalb des Unternehmens auf, bei externen Ursachen führen diese Fehler dementsprechend bei Lieferanten zu Lieferausfällen.

Die Auswirkungen von Fehlteilen auf die Projekte spiegeln sich in Lieferverspätungen und unvollständigen Kits und Komplettlieferungen wider. Diese haben neben der Verschlechterung der Liefertreue und möglichen Strafkosten auch negative Auswirkungen auf die Kapitalbindung, die im nächsten Abschnitt erläutert wird.

Planungsverfahren zur Optimierung der Liefertreue von Komplettlieferungen und Kits unterliegen hinsichtlich der Materialien also der Einschränkung, dass zunächst keine frei verfügbaren Rohmaterialien, Komponenten oder Produkte im Netzwerk vorhanden sind. Werden durch Planungsverfahren zusätzliche Bestände oder Pufferzeiten eingeplant, so unterliegen diese den im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Kapitaleinschränkungen¹⁰⁰.

⁹⁸ Siehe [TDH09], S. 167–170.

⁹⁹ Ebd., S. 170.

¹⁰⁰ Vgl. [Koet12], S. 28.

2.2.2.2 Kapital-Restriktionen

Herold stellt, basierend auf der in Formel (2.1) vorgestellten Definition von Kundenzufriedenheit, folgendes Optimierungsmodell auf:¹⁰¹

$$Z = \max \text{Kundenzufriedenheit} = f(\text{Preis, Qualität, Funktionalität, Design, ... , Service}) \quad (2.5)$$

unter der Nebenbedingung:

$$\text{Rentabilität} \geq x\% \quad (2.6)$$

Daraus lässt sich ableiten, dass die „Maximierung der Kundenzufriedenheit stets innerhalb der Grenzen der Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens zu erfolgen hat“¹⁰². Rentabilität lässt sich durch verschiedene Kennzahlen ausdrücken, wobei in den meisten Unternehmen die Kapitalrendite gemessen wird¹⁰³. Mit dem Hintergrund, dass für das eingesetzte Kapital eine möglichst hohe Verzinsung erreicht werden soll, wird der erwirtschaftete Gewinn ins Verhältnis zum eingesetzten Kapital gesetzt. Abbildung 2.9 stellt die für den Lieferanten relevantesten Einflussfaktoren auf die Kapitalrendite dar:

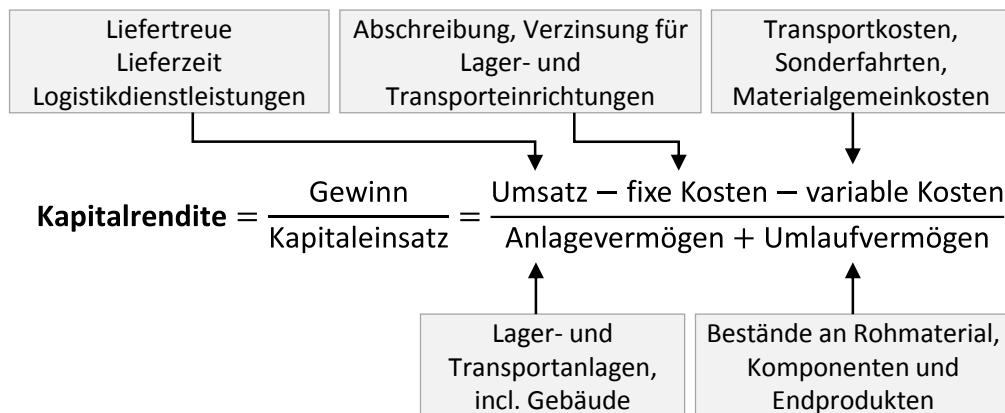


Abbildung 2.9: Einflussfaktoren der Kapitalrendite¹⁰⁴

Es wird deutlich, dass neben Produktinnovationen und Qualität auch eine Steigerung des Lieferservices, wie zum Beispiel durch erhöhte Liefertreue, positive Auswirkungen auf den Umsatz hat und somit geeignet ist, die Kapitalrendite zu erhöhen. Ist allerdings für die Steigerung der Liefertreue zusätzlicher Kapitaleinsatz notwendig, beispielsweise durch die Verwendung weiterer Lager oder die Erhöhung des Bestandes, so hat dies negative Auswirkungen auf die Kapitalrendite. Die Investition in zusätzliches Anlage- bzw.

¹⁰¹ Siehe [Hero05], S. 7.

¹⁰² Ebd.

¹⁰³ Vgl. Return-on-investment in [DS05], S. 8 f. und Economic Value Added in [AIK+08], S. 230.

¹⁰⁴ Aus [Chri05], S. 83 ff. und [Koet12], S. 21. Für eine detailliertere Auflistung der Einflussfaktoren nach DuPont-Schema siehe z. B. [Hopp08], S. 17 f.

Umlaufvermögen wirkt sich auch negativ auf die Liquidität¹⁰⁵ eines Unternehmens aus. So verursacht jede in Beständen gebundene Geldeinheit Zinskosten und kann nicht für alternative Investitionen verwendet werden¹⁰⁶.

Dieser Zielkonflikt zwischen der Steigerung des Lieferservices und der Reduzierung der Kosten¹⁰⁷ wird im betrachteten Liefernetzwerk aufgrund von strategischen Entscheidungen durch die Betrachtung der Kosten als Nebenbedingung aufgelöst¹⁰⁸. Maßnahmen zur Steigerung der Liefertreue werden so durch ein exakt beziffertes Budget gesteuert, was je nach wirtschaftlicher Situation und Zielpriorisierung auf der strategischen Ebene angepasst wird¹⁰⁹. Bei der Budgetierung muss jedoch das Dilemma des Lieferservice berücksichtigt werden, das besagt, dass nicht jede Investition in den Lieferservice durch adäquat steigende Umsätze gerechtfertigt ist¹¹⁰.

2.2.2.3 Betriebsmittel-Restriktionen

Investitionen in Lager- und Transportanlagen sind langfristige Entscheidungen von nur sehr geringer Liquidierbarkeit¹¹¹. Dementsprechend ist die Dimensionierung solcher Anlagen in optimiert geplanten und geführten Supply Chains gerade ausreichend für die geplanten Volumina. Verfahren zur Verbesserung des Lieferservices unterliegen dadurch Einschränkungen hinsichtlich der Ausnutzung der vorhandenen Lagerressourcen. Existieren schon im normalen Betrieb Engpässe, zum Beispiel bei der Lagerkapazität, so stehen diese Ressourcen nicht für die Planungsverfahren zur Verfügung.

¹⁰⁵ „Liquidität ist die Fähigkeit des Unternehmens, zu jedem Zeitpunkt alle erforderlichen Auszahlungen aus (zeitgleichen) Einzahlungen und/oder Zahlungsmittelbeständen zu bestreiten.“ [DS05], S. 235.

¹⁰⁶ Siehe [Hero05], S. 328.

¹⁰⁷ Vgl. [SSE06], S. 2 und [Pfoh10], S. 97.

¹⁰⁸ Die Alternative wäre die Kostenminimierung bei vorgegebenen Lieferservice-Zielen, vgl. dazu [Schö11], S. 40 und die Differenzierung von Bestand als Ziel- und Bewertungsgröße in [Lödd05], S. 33.

¹⁰⁹ Dies entspricht der Erfüllung der Forderung der Kostenbezifferung für Verbesserungen im Lieferservice in [GN06], S. 23–25.

¹¹⁰ Siehe [Melz07], S. 23 und vgl. Grafik „Service Level / Cost of Services“ in [Chri05], S. 67.

¹¹¹ Vgl. [Deli13], S. 9.

2.2.2.4 Berücksichtigung von Unsicherheit und der dadurch ausgelösten Störungen

Im Rahmen des Supply-Chain-Managements ist die Bewältigung von Unsicherheit eines der wichtigsten zu lösenden Probleme¹¹². Unsicherheit allgemein wird als „ein nicht starker, nicht fester oder als ein von Schwankungen unterworfenen[r] Zustand beschrieben, der die Möglichkeit des Abweichens von einem erwarteten Wert oder einer erwarteten Situation impliziert“¹¹³. Im Kontext des beschriebenen Liefernetzwerks bedeutet dies, dass durch Unsicherheit Störungen an beliebigen Punkten innerhalb des Netzwerks, beispielsweise in Quellen, Logistikstationen oder Produktionsstationen, ausgelöst werden können¹¹⁴. Dadurch wird die ursprüngliche Planung hinfällig und die notwendigen Korrekturen führen oft zu einer Verschlechterung der Planungsgüte¹¹⁵, was sich wiederum negativ auf die Liefertreue auswirkt¹¹⁶.

Zur genaueren Beschreibung der ausgelösten Störungen können diese in Prozess- und Planstörungen unterteilt werden¹¹⁷. Prozessstörungen treten auf, wenn der Systemzustand vom geplanten Zustand abweicht, während Planstörungen durch die Veränderung von Planvorgaben entstehen. Schneeweiß nimmt eine weitere Unterteilung in Primär- und Sekundärstörungen vor, wobei Primärstörungen Zustandsabweichungen darstellen, die nicht aus anderen Störungen resultieren und mit Informationsänderungen verbunden sind. Sekundärstörungen sind Folgestörungen aufgrund von Primärstörungen. Jensen ergänzt diese Definitionen im Produktionskontext um die Unterscheidung der Störungen hinsichtlich mengenmäßiger oder zeitlicher Ausprägungen und weist darauf hin, dass zeitliche Abweichungen häufiger auftreten und problematischere Auswirkungen mit sich bringen als mengenmäßige Abweichungen¹¹⁸.

¹¹² Siehe [GN06], S. 23. Dies trifft insbesondere auf globale Supply Chains, die Lean- und JIT-Prinzipien anwenden zu. Siehe [Schö11], S. 159.

¹¹³ [Ilie07], S. 19. Generell sind beim Umgang mit Unsicherheit drei Situationen unterscheidbar. Sicherheitssituationen liegen vor, wenn die eintretenden Auswirkungen bekannt und deterministisch sind. In Risikosituationen sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten alternativer Entwicklungen bekannt, wohingegen unter Ungewissheit nur die alternativen Entwicklungen, aber keine Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt sind. Risiko- und Ungewissheitssituationen werden unter dem Begriff Unsicherheit zusammengefasst. Siehe [Neun09], S. 141, [Zsch07], S. 11–22 ebd. und [DS05], S. 49.

¹¹⁴ [SHS12], S. 4494. Vgl. auch [VDA07], S. 14 „Eine Störgröße ist [...] eine Einflussgröße, die außerhalb der geplanten Toleranz verläuft und die Leistungsfähigkeit [...] negativ beeinflusst.“

¹¹⁵ Vgl. [Gebh09], S. 21.

¹¹⁶ Vgl. [SHS12], S. 4493.

¹¹⁷ Siehe [Schn92], S. 122 f.

¹¹⁸ Siehe [Jens96], S. 23.

Unsicherheiten und die dadurch ausgelösten Störungen lassen sich weiterhin hinsichtlich ihres Ursprungs unterscheiden, Abbildung 2.10 zeigt eine mögliche Klassifizierung nach Gebhard¹¹⁹.

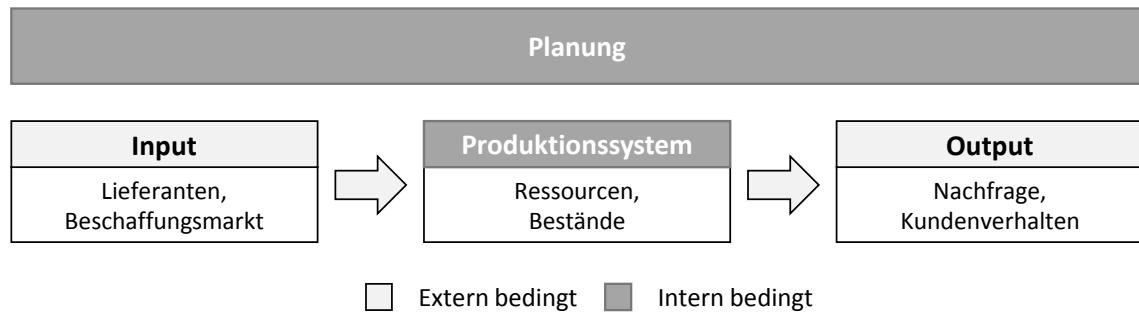


Abbildung 2.10: Quellen der Unsicherheit¹²⁰

Dabei wird zunächst zwischen internen und externen Ursprüngen unterschieden, abhängig davon, ob die Störungsquelle innerhalb oder außerhalb des Einflussbereichs des betrachteten Unternehmens liegt. Zuliefer- und Nachfrageprozesse fallen in die zweite Kategorie. Beispiele für Inputunsicherheiten sind Abweichungen von Liefermengen oder Lieferterminen, insbesondere durch Schwankungen der Wiederbeschaffungszeiten¹²¹. Bezuglich des Outputs können veränderte Nachfragewerte, Stornierungen oder Eilaufträge auftreten. Die Gründe der intern bedingten Unsicherheit im Produktionssystem sind beispielsweise Ausschuss, schwankende Produktionszeiten oder Maschinenausfälle.

Auftretende Störungen im Kontext des betrachteten Liefernetzwerks sind Terminabweichungen bei der Beschaffung oder Produktion von benötigten Teilen¹²². Es existieren vorwiegend Störungen im Input mit zeitlichen Abweichungen bei den Lieferterminen und im Produktionssystem bei den Durchlaufzeiten. Im Output kann die Nachfrage jedoch als sicher und konstant betrachtet werden.

Problematisch ist die unzureichende Berücksichtigung der Unsicherheit als Ursache von möglichen Störungen durch die im Liefernetzwerk eingesetzten Planungssysteme. Grundsätzlich nutzt das verwendete MRP-II-Verfahren zwar das Konzept der rollierenden Planung¹²³, das für den Einsatz in Unsicherheitssituationen geeignet ist, in denen

¹¹⁹ Siehe [Gebh09], S. 21 ff.

¹²⁰ In Anlehnung an ebd., S. 22. Alternative Klassifikationen unterscheiden System- und Umgebungsursprünge oder zusätzlich Informationsunsicherheiten. Vgl. dazu [Bick02], S. 6, [KSJ02], S. 2399–2419 und [MPG+06], S. 271.

¹²¹ Für eine detaillierte Auflistung der Ursachen vgl. [SHS12], S. 4499, [KGS07] und [KS06], S. 113.

¹²² Vgl. dazu auch die Definition in [Melz07], S. 189: „Störungen sind Ereignisse auf dem Beschaffungsmarkt, in der eigenen Prozesskette und auf dem Absatzmarkt, die die Einhaltung des vereinbarten Liefertermins gefährden.“

¹²³ Siehe [Neun09], S. 143–145 und [AIK+08], S. 166.

Entscheidungen durch zeitlich-vertikale Interdependenzen¹²⁴ miteinander verbunden sind. Dabei existiert eine gestaffelte Entscheidungssequenz, innerhalb derer die Planung in regelmäßigen Abständen wiederholt und zum Teil revidiert wird¹²⁵. Da in der Realität die Unsicherheit bei Entscheidungen steigt, je weiter diese vom aktuellen Zeitpunkt entfernt sind, profitiert jeder neue Planungslauf von einem Informationszuwachs gegenüber dem vorherigen Lauf. Entscheidungen vom aktuellen bis zum nächsten Planungszeitpunkt werden verbindlich getroffen, wohingegen die Entscheidungen darüber hinaus zunächst nur vorläufiger Natur sind und in einem späteren Planungslauf revidiert werden können¹²⁶. In Abbildung 2.11 werden der Ablauf und die Begrifflichkeiten der rollierenden Planung verdeutlicht:

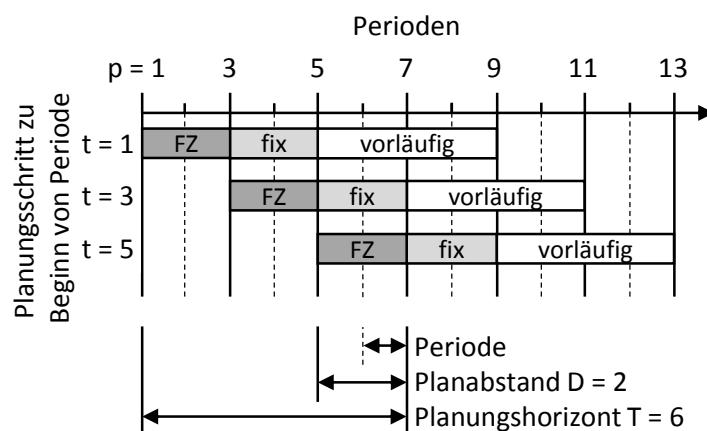


Abbildung 2.11: Rollierende Planung¹²⁷

Die Reichweite der Planung zu einem Planungszeitpunkt t_0 wird durch den Planungshorizont T eingeschränkt. Der nächste Planungszeitpunkt t_1 ist um den Planabstand D verschoben, wobei $D < t_0 + T$ gilt. Entsprechend sind alle Entscheidungen von t_0 bis t_1 endgültig zu treffen. Entscheidungen darüber hinaus sind im nächsten Planungslauf noch revidierbar. Die Revidierbarkeit der Entscheidungen wirkt sich durch den Informationszuwachs einerseits positiv aus. Andererseits führt diese bei häufigen Änderungen zu einer hohen Nervosität des Planes, die negative Folgen für die Planakzeptanz und den Ablauf der Realisierung haben kann¹²⁸. Um dem entgegenzuwirken, existiert beim betrachteten Lieferanten noch zusätzlich ein fixierter Bereich, die sogenannte Frozen Zone (FZ). In

¹²⁴ Das bedeutet, dass die Entscheidungsmöglichkeiten sowie die Ergebnisse der Entscheidungen von früheren Entscheidungen abhängig sind.

¹²⁵ Dabei werden zunächst nur Bestell- und Fertigungsvorschläge mit vorläufigem Charakter generiert, die erst mit der Auftragsfreigabe endgültig umgesetzt werden. Siehe [Wann10], S. 586 f.

¹²⁶ Vgl. [Gebh09], S. 18 f.

¹²⁷ In Anlehnung an [Scho01], S. 34.

¹²⁸ Ebd., S. 94 f.

diesem Zeithorizont können Entscheidungen nicht mehr verändert werden, wodurch die Nervosität des Planes verringert wird¹²⁹.

Zur Planung werden jedoch nur deterministische Eingabedaten verwendet. Stochastische Einflüsse, wie beispielsweise bei Wiederbeschaffungszeiten und Durchlaufzeiten¹³⁰, werden komplett vernachlässigt. Da Störungen in der Realität durch verspätete Lieferungen von Zulieferern oder durch Maschinenausfälle jedoch auftreten¹³¹, führt die dadurch erfolgende spätere Abweichung vom Plan zu Prozessstörungen, deren Korrektur wiederum Sekundärstörungen in Form von Planstörungen verursachen kann¹³².

Mögliche Planungsverfahren zur Verbesserung der Liefertreue müssen also die zuvor beschriebenen Ausprägungen der Unsicherheit und die dadurch ausgelösten Störungen adäquat berücksichtigen¹³³.

¹²⁹ Vgl. [KS08], S. 193, [Alic05], S. 96 f. und [GGR+05]. So existieren beispielsweise vorläufige Fertigungsvorschläge, deren Ausführungszeitpunkt noch verändert werden kann. Für die ursprüngliche Planung dieser Aufträge sind jedoch im kurzfristigen Bereich häufig schon Vorarbeiten wie Beschaffungsaufträge realisiert worden. Durch den Einsatz der Frozen Zone sind diese kurzfristigen Planänderungen dann unzulässig.

¹³⁰ Siehe [Alic05], S. 4 und [Inde09], S. 474. Die trifft ebenso auf die eingesetzten ERP- und MRP-II-Systeme zu, da diese im Kern auf der MRP-Logik aufbauen. Siehe [KS06], S. 110.

¹³¹ Vgl. [LDH08], S. 236, [KSL06], S. 626

¹³² Zum Eintrittszeitpunkt hat die rollierende Planung dann keinen Einfluss mehr.

¹³³ Vgl. [Gebh09], S. 21.

3 Stand der Technik

3.1 Allgemeingültige Planungskonzepte zur Berücksichtigung von Unsicherheit

3.1.1 Bewältigungsmaßnahmen nach Schneeweiß

Schneeweiß definiert fünf mögliche Verhaltensweisen zur Berücksichtigung von Unsicherheit und der Bewältigung der daraus resultierenden Störungen¹³⁴:

1. **Elimination:** Eliminierung der Quelle der Unsicherheit. Die dabei eintretende Sicherheitssituation verhindert das Auftreten von Störungen grundlegend.
2. **Evasion:** Vermeidung der Unsicherheit durch Ausweichen, beispielsweise durch Wechsel von häufig lieferuntreuen Lieferanten zu Eigenfertigung.
3. **Immunisierung:** Wirtschaftliche Absicherung der Unsicherheit. Beispielsweise durch Versicherungen gegen Störungen.
4. **Präventivmaßnahmen:** Abfangen der Störungen, ohne dass weitere Sekundärstörungen entstehen können. Dazu müssen zuvor durch geeignete Maßnahmen entsprechende Potenziale, wie zum Beispiel Sicherheitsbestände, aufgebaut werden.
5. **Sanierungsmaßnahmen:** Beseitigung der Folgen einer eingetretenen Störung.

Die ersten drei Ebenen, die auf die Behebung der Ursachen abzielen, werden unter dem Schlagwort Prophylaxe zusammengefasst und sind zumeist auf hierarchisch hoch ange-siedelten Planungsebenen angesiedelt. Auf dieser Grundlage bauen die unter Redundanzmaßnahmen zusammengefassten Präventiv- und Sanierungsmaßnahmen auf. Diese setzen an den Auswirkungen der schon ausgelösten Störungen an, wobei sie sich hinsichtlich der Reagibilität unterscheiden. Präventivmaßnahmen beseitigen Störungen durch zuvor aufgebaute Flexibilitätspotenziale direkt, Sanierungsmaßnahmen benötigten eine entsprechende Sanierungszeit, bis alle Folgen der Störung behoben sind¹³⁵. Idealerweise werden beide Redundanzmaßnahmen kombiniert eingesetzt, sodass zunächst ein präventives Flexibilitätspotenzial aufgebaut wird, wobei zu diesem Zeitpunkt noch keine detaillierten Erkenntnisse über die tatsächlichen Störungen vorliegen. Reicht das Potenzial bei Eintritt einer Störung zu ihrer Beseitigung nicht aus, können ergänzend Sanierungsmaßnahmen unter genauer Kenntnis der Störung eingesetzt werden.

¹³⁴ Siehe [Schn92], S. 124–126.

¹³⁵ Siehe ebd., S. 127–129.

Am konkreten Beispiel der Liefertreue bedeutet dies, dass durch geeignete prophylaktische Maßnahmen ein Basislevel bezüglich der Liefertreue erreicht wird. Ist das Basislevel für bestimmte Auftragstypen unzureichend, können ergänzend Redundanzmaßnahmen eingesetzt werden. Wie in Abbildung 3.1 ersichtlich, kann durch jede Steigerung des Basislevels eine Reduzierung der notwendigen Redundanzmaßnahmen erreicht werden¹³⁶.

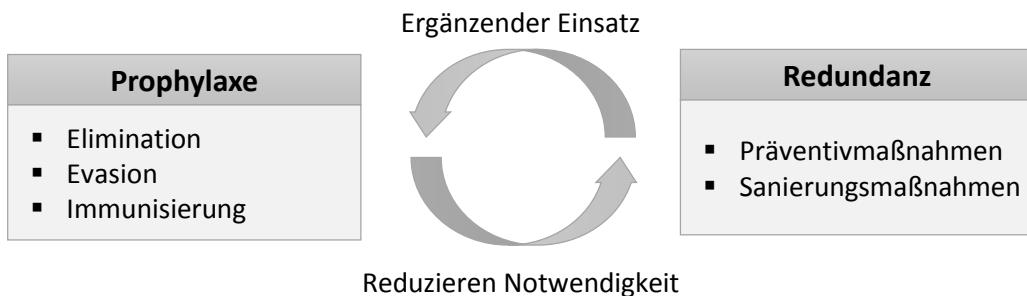


Abbildung 3.1: Dualer Ansatz

Eine Steigerung des Basislevels sollte jedoch nur in einem wirtschaftlich vernünftigen Rahmen erfolgen. Denn je höher das Ausgangslevel liegt, desto kostenintensiver wird eine weitere Steigerung. Da für die regulären Lieferungen des betrachteten Problems ein ausreichendes Basislevel vorliegt und diese den überwiegenden Anteil der Aufträge ausmachen, wird im Weiteren der Fokus auf ergänzende Redundanzmaßnahmen für Komplettlieferungen und Kits gelegt¹³⁷.

3.1.2 Fehlteilmanagement

Nicht alle Planungskonzepte beziehen sich explizit auf Unsicherheit oder allgemein auf Störungen. Stattdessen werden konkrete Untergruppen von Störungen betrachtet und behandelt. Aufgrund des vorliegenden Fokus auf die Liefertreue bietet das Fehlteilmanagements an dieser Stelle ebenfalls geeignete Ansätze¹³⁸. Ein Fehlteil ist dabei als ein Teil definiert, das zum Auslieferungs- oder Produktionszeitpunkt nicht in der notwendigen Quantität und Qualität am Verbrauchsort vorliegt. Mit der steigenden Komplexität der Produktions- und Liefernetzwerke steigt auch das allgemeine Risiko für Fehlteile.

¹³⁶ Vgl. [KDZ10].

¹³⁷ Ein weiterer Grund für den Fokus auf Redundanzmaßnahmen ist, dass diese allgemeingültig definiert werden können. Im Gegensatz dazu sind die prophylaktischen Maßnahmen meist stark abhängig von detaillierten unternehmensspezifischen Umständen.

¹³⁸ Das Fehlteilmanagement weist eine große Übereinstimmung mit den zuvor beschriebenen Redundanzmaßnahmen auf. Der Vollständigkeit halber wird es an dieser Stelle trotzdem noch kurz erläutert.

Thun, Drüke und Hoenig unterteilen die Ansätze des Fehlteilmanagements in zwei Bereiche:¹³⁹

1. **Präventives Fehlteilmanagement:** Versucht, das Auftreten eines Fehlteils an sich zu verhindern beziehungsweise dessen Eintrittswahrscheinlichkeit zu senken. Dabei muss zunächst eine Identifikation der möglichen Fehlteile erfolgen.
2. **Reaktives Fehlteilmanagement:** Wirkungsbezogene Maßnahmen, die die Konsequenzen eines entstandenen Fehlteils verringern. Dabei spielt die Elastizität der Prozesse eine wichtige Rolle. Diese ist die „Fähigkeit [...], nach dem Eintreten eines Fehlteils wieder zum ursprünglichen Zustand zurückzukehren oder aber einen neuen, adäquaten Zustand anzunehmen.“¹⁴⁰ Elastizität kann dabei sowohl durch die Generierung von Redundanzen, wie zum Beispiel durch Sicherheitsbestände, als auch durch die Steigerung der Flexibilität der Prozesse erreicht werden. Dies kann zum Beispiel die kurzfristige Flexibilität zur Änderung der Produktions- oder Versorgungsreihenfolge sein.

Die Steuerung beider Maßnahmen muss zudem auf die möglichen Konsequenzen eines Fehlteils abgestimmt werden. Dabei wird zwischen internen Konsequenzen, die sich nur innerhalb der eigenen Produktion oder des eigenen Unternehmens auswirken, und schwerwiegenderen externen Konsequenzen unterschieden. Diese betreffen andere Unternehmen und haben beispielsweise die Reduktion der Kundenzufriedenheit oder Pönalstrafen zur Folge¹⁴¹.

¹³⁹ Siehe [TDH09], S. 172–179.

¹⁴⁰ Ebd., S. 176.

¹⁴¹ Siehe ebd., S. 172.

3.2 Umgang mit Unsicherheit im Rahmen des MRP-II-Konzepts

3.2.1 Klassifizierung der Maßnahmen

Im Kontext der MRP-basierten Produktionsplanung und -steuerung findet sich in der Literatur eine mehrfache Einteilung der Maßnahmen zum Umgang mit Unsicherheit und den daraus resultierenden Störungen. Auf der obersten Ebene erfolgt eine Einteilung in zwei Kategorien¹⁴²:

1. Reduzierung der Unsicherheit („Reducing“)
2. Bewältigung der Unsicherheit („Coping and Mitigation“)

Die Reduzierung der Unsicherheit entspricht einer Ursachenbehebung, analog der Elimination und Evasion nach Schneeweiß. Ursachen sind jedoch in den meisten Fällen unternehmensspezifisch und ihre Behebung erfordert detaillierte Informationen zum jeweiligen Sachverhalt¹⁴³. Aufgrund des ausreichenden Basislevels der Liefertreue und der Vielfalt der möglichen Quellen von Unsicherheit¹⁴⁴ erfolgt im Weiteren der Fokus auf allgemeingültigere Gegenmaßnahmen zur Bewältigung. Diese werden im Englischen unter „Coping with Uncertainty“ zusammengefasst und beziehen sich oftmals auf die korrekte Parametrisierung des MRP-Verfahrens¹⁴⁵ zur präventiven Bewältigung von Störungen oder Maßnahmen zur Abschwächung der Auswirkungen („mitigation“) einer eingetretenen Störung. Somit entsprechen diese den Redundanzmaßnahmen nach Schneeweiß.

Koh et al.¹⁴⁶ nehmen eine weitere Unterteilung in „Buffering“ und „Dampening“ (Puffer- und Dämpfungsmaßnahmen) vor. Während Puffermaßnahmen mit zusätzlichen Materialquantitäten arbeiten, werden alle weiteren Maßnahmen unter Dämpfungsverfahren zusammengefasst. Nachfolgend werden die in Literatur und Praxis häufig eingesetzten Maßnahmen aus Abbildung 3.2 vorgestellt¹⁴⁷.

¹⁴² Siehe [SHS12], S. 4495.

¹⁴³ Vgl. [Jens96], S. 29.

¹⁴⁴ Vgl. Grafik 1 in [KS06], S. 113 und Tabelle 1 in [SHS12], S. 4499. Für spezifische Ursachen für Lieferuntreue vgl. [Melz07], S. 179 ff.

¹⁴⁵ Vgl. [DP07], S. 271.

¹⁴⁶ Siehe [KS04], S. 241 und [KSL06], S. 628f.

¹⁴⁷ Es existieren noch weitere Parameter und Maßnahmen, wie z. B. die Parametrisierung und Auswahl von Losgrößenregeln, die Überschätzung der Nachfragemenge (Hedging) oder die Unterschätzung der Ausbringungsmenge (Yield factor). Vgl. dazu [IV13], S. 293, [LD11], S. 1 f., [Temp06b], S. 231 und [GS00], S. 224–228. Der Fokus erfolgt jedoch auf die zuvor im Text genannten Methoden, da diese insbesondere bei schwankenden Durchlaufzeiten empfohlen werden [DP07], S. 276.



Abbildung 3.2: Auswahl von Maßnahmen zur Bewältigung von Unsicherheit¹⁴⁸

3.2.1.1 Sicherheitsbestand

Sicherheitsbestände zählen zusammen mit den nachfolgend vorgestellten Sicherheitszeiten aufgrund ihrer leichten Umsetzbarkeit¹⁴⁹ und Eignung, insbesondere bei Durchlaufzeitschwankungen¹⁵⁰, zu den in der Praxis am weitesten verbreiteten Maßnahmen. Dabei stellt der Sicherheitsbestand eine eiserne Reserve dar, die permanent auf Lager gehalten wird. Diese Menge ist dispositiv nicht frei verfügbar und zum Ausgleich von außergewöhnlichen Ereignissen, wie zum Beispiel Störungen im regulären Materialfluss, vorgesehen¹⁵¹. Sicherheitsbestände wirken sich positiv auf die Liefertreue aus, verursachen jedoch Lagerhaltungs- und Kapitalbindungskosten¹⁵².

In der Praxis werden Sicherheitsbestände oftmals manuell durch Disponenten anhand von Erfahrungen oder durch einfache Formeln bestimmt¹⁵³. Dieses Vorgehen eignet sich jedoch nicht für mehrstufige konvergierende Liefernetzwerke¹⁵⁴. Oftmals erfolgt auf jeder Netzwerkstufe eine isolierte Planung der Sicherheitsbestände, wodurch Interdependenzen zwischen den Stufen und die daraus resultierende erweiterte Entkopplungsfunktion¹⁵⁵ der Sicherheitsbestände nicht ausreichend berücksichtigt werden. Des Weiteren existieren in konvergierenden Netzwerken durch Gleichteile in den Montagestücklisten Interdependenzen zwischen Sicherheitsbeständen einer Stufe, die ebenfalls nicht berücksichtigt werden¹⁵⁶.

¹⁴⁸ Auf die rollierende Planung wurde bereits in Kapitel 2.2.2.4 eingegangen.

¹⁴⁹ Siehe [Gebh09], S. 27.

¹⁵⁰ Vgl. [HDD10], S. 1835 und [BFH09], S. 121 f.

¹⁵¹ Siehe [Jens96], S. 31 f. und [Dang09], S. 486–491.

¹⁵² Siehe [Pföh10], S. 97–106.

¹⁵³ Vgl. dazu [Schö11], S. 538, [Hopp08], S. 387–389 und [Gude12], S. 88.

¹⁵⁴ Produktionssysteme, in denen Montagearbeiten stattfinden, sind konvergierende Systeme.

¹⁵⁵ Siehe [MS10], S. 5 und [Stad05], S. 584.

¹⁵⁶ Vgl. [DP07], S. 270.

In solchen Netzwerken ist eine simultane, projekt- und stufenübergreifende Optimierung der Sicherheitsbestände effizienter, da diese die Komplexität der Interdependenzen im gesamten Liefernetzwerk berücksichtigt und die Kosten sowie den erreichten Service global betrachtet. Das Ergebnis umfasst also nicht nur eine optimale Entscheidung über die Höhe, sondern auch über die Positionierung der Sicherheitsbestände im Netzwerk¹⁵⁷.

Durch die projektbasierten Aufträge müssen die projektindividuellen Komponenten und Produkte bei der Planung besondere Berücksichtigung finden. Aufgrund der normalerweise langfristigen Projektanläufe ist der Aufbau von Sicherheitsbestand problemlos möglich, einzig kurzfristige Konstruktionsänderungen in der Anlaufphase können zu obsoleten Sicherheitsbeständen führen. Ebenso muss sichergestellt sein, dass vorhandene Sicherheitsbestände von projektindividuellen Materialien gegen Projektende abgebaut werden.

3.2.1.2 Sicherheitszeit

Sicherheitszeiten¹⁵⁸ sind auftragsbezogene Parameter und bewirken ein Vorziehen des spätestens zulässigen Produktions- bzw. Beschaffungstermins um die Größe der Sicherheitszeit¹⁵⁹. Dadurch entsteht ein Lieferzeitpuffer, in dessen Rahmen Schwankungen der Durchlaufzeit aufgefangen werden können und die Liefertreue gesteigert werden kann¹⁶⁰.

Sicherheitszeiten wirken sich nur temporär auf die Kapitalbindung aus, da die so vorübergehend erzeugten Sicherheitsbestände nur in Verbindung mit einem konkreten Planauftrag existieren und durch den Auftrag bei Fälligkeit des Bedarfs wieder aufgelöst werden¹⁶¹. Dadurch beschränkt sich der Nutzen von Sicherheitszeiten auf den dazugehörigen Auftrag. Nur in seltenen Fällen ermöglicht die Überschneidung von mehreren Aufträgen mit Sicherheitszeiten eine übergreifende Nutzung der einhergehenden temporären Sicherheitsbestände. Abbildung 3.3 verdeutlicht die Auswirkungen von Sicherheitszeiten auf die Bedarfswirksamkeit.

¹⁵⁷ Siehe [SF10], S. 91–95 für simultane Bestandsoptimierung. Die Ergänzung um die projektiübergreifende Eigenschaft resultiert aus dem Verhalten, dass in vielen Fällen der Sicherheitsbestand in projektgetriebenen Supply Chains isoliert je Projekt ermittelt wird. Hier kann durch die Analogie zur isolierten Stufenbetrachtung, durch eine simultane und übergreifende Optimierung eine Verbesserung erreicht werden. Vgl. [XZC12], S. 2.

¹⁵⁸ Synonyme Bezeichnungen sind unter anderem Sicherheitsfrist [Schö11], S. 538 und Bedarfsvorlaufzeit [Hopp08], S. 403.

¹⁵⁹ [Temp06b], S. 237.

¹⁶⁰ Vgl. [Lödd05], S. 43 ff.

¹⁶¹ Siehe [Jens96], S. 32.

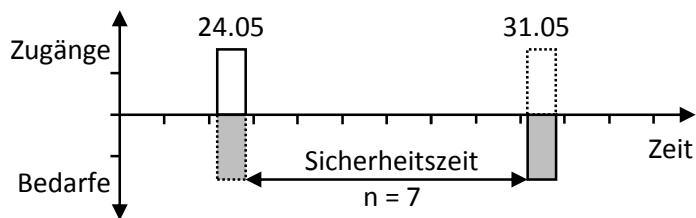


Abbildung 3.3: Auswirkungen der Sicherheitszeit¹⁶²

Der reale Bedarf ist im Beispiel am 31. Mai fällig, durch eine Sicherheitszeit von sieben Tagen wird dieser jedoch im System schon am 24. Mai wirksam. Entsprechend verschiebt sich der Zulauf ebenfalls um sieben Tage. In der Zeit vom 24.05 bis 31.05 wirkt sich die Auftragsmenge dann als kapitalbindender Sicherheitsbestand aus.

3.2.1.3 Rescheduling

Während der Ausführung eines Plans können durch Störungen Differenzen der Soll- und Ist-Vorgaben in Form von zeitlichen Abweichungen von Start- und Fertigstellungsterminen oder Reihenfolgeänderungen entstehen. Dies kann entweder ohne Reaktion akzeptiert werden oder die ursprüngliche Planung wird angepasst. Dieser Anpassungsprozess eines Plans an Störungen wird als Rescheduling bezeichnet¹⁶³.

Zur Eingrenzung des Begriffes und weiteren Klassifizierung der angewandten Methoden wurde von Vieira et al. das in Abbildung 3.4 dargestellte Framework vorgeschlagen¹⁶⁴.

Initial erfolgt die Definition der *Rescheduling-Umgebung* anhand der Eigenschaften der einzuplanenden Aufgaben. In statischen Umgebungen ist die Anzahl der betrachteten Aufgaben endlich und Informationen über Eigenschaften und Verhalten liegen entweder in deterministischer oder stochastischer Form vor. In dynamischen Umgebungen ist die Anzahl der Aufgaben unbegrenzt, da im Zeitverlauf immer neue einzuplanende Aufgaben hinzukommen. Zusätzliche Unterteilungen können anhand der Ankunftszeit-Charakteristika der Aufgaben erfolgen.

¹⁶² Aus [Hopp08], S. 404.

¹⁶³ Siehe [Herr06], S. 135 f. Dabei werden Störungen in diesem Zusammenhang auch als rescheduling factors bezeichnet. Vgl. auch [HP04], S. 440.

¹⁶⁴ Abbildung und Beschreibung siehe [VHL03], S. 40–55.

Rescheduling-Umgebung				
Statisch		Dynamisch		
Deterministisch	Stochastisch	Feste Eintreffzeiten	Variable Eintreffzeiten	Variable Prozessdauer

Rescheduling-Strategie			
Dynamisch	Prädiktiv-Reaktiv		
Keine Planerzeugung / Regelbasiert	Periodisches Rescheduling	Eventbasiertes Rescheduling	Hybrides Rescheduling

Rescheduling-Methoden				
Planerzeugung		Planreparatur		
Nominale Pläne	Robuste Pläne	Right-shift-Rescheduling	Partielles Rescheduling	Vollständiges Rescheduling

Abbildung 3.4: Rescheduling-Framework

Bezüglich der *Rescheduling-Strategie* existieren zwei grundlegende Klassen. Dynamische Strategien erzeugen keinen langfristigen Plan, sondern entscheiden bei Bedarf ad hoc über die Einplanung der Aufgaben. Im Gegensatz dazu erzeugt das vorwiegend in der Praxis eingesetzte prädiktiv-reaktive Scheduling in einem ersten Schritt einen gültigen Plan und aktualisiert diesen in einem zweiten Schritt als Reaktion auf Störungen. Dabei werden mittels einer Richtlinie die Zeitpunkte für das Rescheduling festgelegt. Periodisches Rescheduling erfolgt in regelmäßigen Abständen und entspricht dem Konzept der rollierenden Planung. Eventbasiertes Rescheduling stößt eine Neuplanung aufgrund von zuvor definierten Auslöseereignissen, die Zustandsänderungen entsprechen, an. Werden beide Richtlinien kombiniert, so spricht man von hybirdem Rescheduling.

Die *Rescheduling-Methoden* legen fest, wie ein Plan erzeugt und aktualisiert wird. Für jeden der Schritte der prädiktiv-reaktiven Strategie existieren entsprechende Methoden. Im ersten Schritt muss ein Ausgangsplan erzeugt werden. In vielen Verfahren geschieht dies ohne die Berücksichtigung möglicher späterer Störungen. Werden diese jedoch explizit bei der Planung mit einbezogen, sodass die Zielerreichung des Plans auch unter Störeinflüssen möglich ist, spricht man von robustem oder proaktivem Rescheduling¹⁶⁵. Methoden für Schritt zwei reagieren auf Eintritt einer Störung und versuchen durch Reparaturmaßnahmen den ursprünglichen Plan an die geänderten Gegebenheiten anzupassen¹⁶⁶. Dabei werden nacheinander die Schritte Evaluation, Lösungsfindung und Revision durchgeführt. Zuerst müssen die Auswirkungen der Störung evaluiert werden. Führen

¹⁶⁵ Vgl. [KJF10], S. 266.

¹⁶⁶ Dies entspricht dem akuten Störungsmanagement.

diese zu Verschlechterungen oberhalb einer tolerierbaren Schwelle, so werden in der Lösungsfindungs-Phase bessere Alternativpläne durch Reparaturmethoden ermittelt. Reparaturen können sich dabei nur auf die direkt oder indirekt betroffenen Aufträge beziehen, dies wird als partielles Rescheduling bezeichnet. Eine einfache und oft verwendete Methode dafür ist das Right-shift-Rescheduling, bei dem alle betroffenen Aufgaben um die durch die Störung verursachte Verzögerung später eingeplant werden. Alternativ kann der gesamte Plan ab dem Störungszeitpunkt neu erstellt werden. In der finalen Revisionsphase muss dann der ursprüngliche Plan durch die Reparatur-Änderungen modifiziert oder durch den neu generierten Plan ersetzt werden.

Das eingesetzte MRP-II-Verfahren agiert im betrachteten Fall in einer statisch-stochastischen Umgebung¹⁶⁷ in der die Eintreffzeiten der Unterlieferanten und die Dauer der eigenen Prozesse variabel sind. Die rollierende Planung entspricht dem periodischen prädiktiv-reaktiven Rescheduling, da initial ein nominaler Plan erzeugt wird, der in regelmäßigmäßigem Abstand neu generiert wird.

Das Framework bietet geeignete ergänzende Komponenten zur Verbesserung der Berücksichtigung der Unsicherheit. Dazu zählt insbesondere die Umstellung von nominalen zu robusten Ausgangsplänen durch proaktives Rescheduling und die Ergänzung um kurzfristigere, event-basiert ausgelöste Reparaturmaßnahmen im Bereich der Frozen Zone, so dass insgesamt ein hybrides Rescheduling-Verfahren entsteht.

¹⁶⁷ Zum Planungszeitpunkt ist durch die Langfristigkeit der Projekte die Menge der Aufträge bekannt, also endlich.

3.2.2 Planung von Sicherheitsbeständen und -zeiten

3.2.2.1 Verfahren zur Ermittlung von Sicherheitsbeständen

Es existieren unzählige Publikationen zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen, insbesondere im Make-to-stock-Bereich. Dabei haben die Werke von Simpson sowie Clark und Scarf die Grundsteine für zwei unterschiedliche Ansätze gelegt¹⁶⁸. Auf Simpson basieren Arbeiten zum Guaranteed-Service-Ansatz, bei dem jede Stufe in einem Liefernetzwerk den nachfolgenden Stufen eine festgelegte und somit deterministische Lieferzeit garantiert. Der zweite Ansatz wird als Stochastic-Service bezeichnet, bei denen zwischen zwei Stufen Schwankungen der Lieferzeiten auftreten können. Dies geschieht, wenn nicht ausreichend Material auf der vorhergehenden Stufe lagert und erst neu produziert beziehungsweise beschafft werden muss¹⁶⁹.

Neben dem Fokus auf MTS-Systeme unterliegt ein Großteil der Publikationen jedoch restriktiven Einschränkungen hinsichtlich der Produktanzahl und der Struktur und Stufenzahl des Liefernetzwerks. Außerdem wird in vielen Verfahren nur von einer Unsicherheit der Bedarfe, nicht aber von Schwankungen in Wiederbeschaffungs- und Durchlaufzeiten ausgegangen. Diese eignen sich deswegen nicht für das in Kapitel 2 beschriebene Liefernetzwerk¹⁷⁰. Allen Ansätzen gemein ist, dass als Zielfunktion vorrangig die Kostenminimierung verfolgt wird. Liefertreue beziehungsweise Servicelevel im MTS-Kontext werden entweder als Nebenbedingung mit Mindestwerten berücksichtigt oder in die Zielfunktionen durch Verzugs- bzw. Fehlmengenkosten integriert.

Nachfolgend werden Lösungsansätze vorgestellt, bei denen ein Großteil der grundlegenden Annahmen auf das betrachtete Liefernetzwerk zutrifft. Die jeweiligen Einschränkungen der Verfahren, die einen direkten Einsatz verhindern, werden anschließend in Kapitel 3.2.2.4 zusammenfassend beschrieben.

¹⁶⁸ [Simp58] und [CS60].

¹⁶⁹ Siehe [Klos10] und [GW03], S. 98.

¹⁷⁰ Einige relevante, aber an dieser Stelle nicht anwendbare Arbeiten sind beispielsweise [HW11], [DAV10], [LD09], [SAD+08], [PBM+07], [SZ05], [GT99] und [IM98]. Für eine weiterführende Übersicht vergleiche [MZ13], S. 2 und [OD12], S. 300.

3.2.2.1.1 Verfahren nach Jung et al. [JBP+08]

Jung et al. stellen ein Verfahren zur Ermittlung der optimalen Positionierung und Höhe von Sicherheitsbeständen in MTS-Liefernetzwerken vor. Dabei treffen sie folgende Annahmen:

- Betrachtet wird ein mehrstufiges Netzwerk mit mehreren Produkten.
- Es wird nur eine Periode berücksichtigt.
- Sicherheitsbestand wird nur für Endprodukte in Werken oder nachfolgenden Auslieferlagerorten bestimmt.
- Die Bedarfe der Produkte sind unsicher und für jedes Produkt wurde ein zureichendes Servicelevel definiert.
- Für Halbfabrikate und Rohmaterialien wird problemlose Verfügbarkeit angenommen.

Als Ziel wird die Minimierung der Kosten verfolgt. Diese setzen sich aus dem Wert der Sicherheitsbestände multipliziert mit deren Menge je Werk und Auslieferlagerort, den Verzugskosten für zu spät erfüllte Lieferungen und den Strafkosten für das Unterschreiten der vorgegebenen Servicelevels zusammen. Servicelevels werden dabei nur als weiche Nebenbedingung berücksichtigt, wodurch die vorher als Untergrenze bestimmten Werte gegen Strafkosten unterschritten werden können¹⁷¹.

Da die Servicelevels aufgrund von multiplikativen Abhängigkeiten nicht direkt linear darzustellen sind, ermitteln die Autoren zunächst eine Approximation der sogenannten Performanzfunktionen $f(\theta_{ij})$. Diese ordnen einem Sicherheitsbestandslevel θ_{ij} eines Materials i an Ort j ein damit erreichbares Servicelevel π_{ij} zu. Die Ermittlung des erreichten Servicelevels erfolgt dabei durch diskrete, eventbasierte Simulation¹⁷², in deren Verlauf nur der Bedarf von Material i als stochastischer Einfluss berücksichtigt wird. Innerhalb der Simulation kommt eine Planungs- und Scheduling-Instanz zum Einsatz, die anhand der jeweiligen Situation die nächsten Ablaufschritte ermittelt. Der Simulationsparameter θ_{ij} wird in regelmäßigen Intervallschritten variiert, wobei die Anzahl der Schritte die gewünschte Approximationsdichte angibt. Für jede Variation wird die Simulation erneut ausgeführt. Dieses Vorgehen wird auch als simulationsbasierte Optimierung¹⁷³ bezeichnet und liefert als Ergebnis die Performanzfunktion für den Sicherheitsbestand eines Materials an einem Ort.

¹⁷¹ Vgl. [KS11], S. 180.

¹⁷² Siehe Kapitel 3.3.3.

¹⁷³ Siehe ebd.

Die Approximation wird dabei für jede mögliche Kombination aus Material und Werk oder Lagerort separat durchgeführt, bis alle Performanzfunktionen vorab ermittelt wurden. Diese werden mittels Linearisierungstechniken in ein lineares Optimierungsmodell mit der zuvor beschriebenen Zielsetzung integriert. Um Interdependenzen zwischen nachfolgenden Stufen zu berücksichtigen, wird dabei noch eine Verrechnungsfunktion zwischen den jeweiligen Performancefunktionen für ein Material ergänzt. Das Modell ist anschließend mit handelsüblicher linearer Optimierungssoftware¹⁷⁴ lösbar.

3.2.2.1.2 Verfahren nach Ünlü und Rossetti [ÜR10]

Ünlü und Rossetti stellen im Rahmen eines Vergleichs mehrerer Losgrößenregeln ein Verfahren vor, das diese hinsichtlich des benötigten Sicherheitsbestands unter gleichwerten Serviceleveln vergleichen kann. Es werden die gleichen Annahmen wie bei Jung et al. getroffen, allerdings ist das Modell auf ein Produkt und eine Stufe beschränkt. Das Vorgehen ist ebenfalls gleich, wobei nur die simulationsbasierte Komponente eingesetzt wird. Diese ermittelt den erforderlichen Sicherheitsbestand für das vorgegebene Servicelevel durch die Modifikation der Sicherheitsbestandshöhe. Da bei einem Produkt und einer Stufe keine weiteren Entscheidungen mehr getroffen werden müssen, terminiert das Verfahren an dieser Stelle.

3.2.2.1.3 Weitere Verfahren

Nachfolgend werden Publikationen vorgestellt, die zwar keine konkreten Lösungsmethoden enthalten, aber allgemeine Hinweise bezüglich der Gestaltung von Sicherheitsbeständen liefern.

Chew, Lee und Lau¹⁷⁵ untersuchen die Auswirkung von Gleichteilen in konvergierenden Liefernetzwerken. Resultat ist, dass bei Gleichteilen für verschiedene Komponenten und Produkten eine gemeinsame Planung der Teileversorgung von Komponenten mit Gleichteilen größere Kosteneinsparungen erzielt als eine Planung je Komponente bzw. je Produkt. Übertragen auf Sicherheitsbestände lässt sich daraus ableiten, dass insbesondere Gleichteile von diesen profitieren und die Sicherheitsbestände auch projektübergreifend geplant werden müssen.

¹⁷⁴ Beispielsweise CPLEX oder Gurobi Solver.

¹⁷⁵ [CLL10].

Kanet, Gorman und Stößlein¹⁷⁶ untersuchen die Eigenschaften eines über den Zeitverlauf veränderlichen Sicherheitsbestands. Dieser wird auch als dynamischer Sicherheitsbestand¹⁷⁷ bezeichnet. Anpassungen können dabei aufgrund von Bedarfsänderungen, Änderungen in den zugrunde liegenden Unsicherheiten oder Änderungen der geforderten Liefertreue bzw. Servicelevel-Werte erfolgen. Dabei wird für jeden Zeitpunkt innerhalb des Planungshorizonts die jeweils benötigte Bestandshöhe definiert. Kanet et al. zeigen mittels praktischer Studien, dass durch dynamischen Sicherheitsbestand Kosteneinsparungen gegenüber einem fixen Sicherheitsbestand möglich sind.

Durch diese fortlaufenden geplanten Anpassungen der Höhe des Sicherheitsbestandes in Abhängigkeit der zukünftigen Bedarfe eignen sich dynamische Sicherheitsbestände insbesondere zur Berücksichtigung der projektspezifischen Materialien bei Projektausläufen, da der Abbau dieser Bestände so gezielt vorab eingesteuert werden kann.

3.2.2.2 Verfahren zur Ermittlung von Sicherheitszeiten

Zur Bestimmung von Sicherheitszeiten werden in der Praxis häufig die Durchlaufzeiten pauschal um einen Unsicherheitskoeffizienten vergrößert. Der Faktor wird anhand von vergangenen Erfahrungen und wirtschaftlichen Restriktionen bestimmt¹⁷⁸. Alternativ zu dieser subjektiven Methode existieren viele Verfahren zur Bestimmung der Sicherheitszeiten oder der entsprechenden Anpassung der Durchlaufzeiten¹⁷⁹ an Unsicherheiten. Dabei berücksichtigen jedoch wenige Verfahren die explizit schwankende Wiederbeschaffungs- und Produktionszeiten und noch weniger Verfahren haben einen direkten Bezug zum MRP-Verfahren¹⁸⁰. Zusätzlich unterliegen viele theoretische Verfahren extremen Beschränkungen bezüglich der Annahmen. Diese limitieren die Anwendbarkeit auf wenige Produkte, erlauben keine Überschneidungen bei den Komponenten für verschiedene Produkte und lassen maximal ein bis zwei Stufen im Produktionsnetzwerk zu. Dadurch ist bei diesen eine analytische und optimale Lösungsfindung durch eine einwertige Berücksichtigung der Unsicherheit mittels Erwartungswert möglich. Der Einsatz in komplexen realen Produktionssystemen ist jedoch nicht möglich, weswegen die entsprechenden Verfahren an dieser Stelle nicht näher beschrieben werden¹⁸¹.

¹⁷⁶ [KGS10]. Vgl. auch [Melz07], S. 190.

¹⁷⁷ Vgl. Kapitel 3.2.1.1.

¹⁷⁸ Siehe [LDH08], S. 237.

¹⁷⁹ Beziehungsweise Bestellzeitpunkte in nicht MRP-basierenden MTS-Systemen.

¹⁸⁰ Vgl. [LD11], S. 1 f. und [LDH08], S. 246.

¹⁸¹ Für Beispiele und weiterführende Literaturübersichten siehe [LD11], [CDP09], [LDH08], [Axsä05], [TG03] und [HH01].

3.2.2.2.1 Verfahren nach Hnainen, Delorme und Dolgui [HDD10]

Hnainen et al. haben ein Verfahren zur Festlegung von Freigabezeiten bzw. Bestellzeitpunkten in zweistufigen Montagesystemen entwickelt. Für den Einsatz sind folgende Voraussetzungen notwendig:

- Es existiert nur ein Produkt mit bekanntem Bedarf.
- Es wird nur eine Periode betrachtet.
- Das Produkt wird aus mehreren Halbfabrikaten gefertigt (Ebene 1).
- In die Halbfabrikate gehen Komponenten mit unsicheren Wiederbeschaffungszeiten ein (Ebene 2). Die mathematischen Verteilungen dieser Zeiten sind bekannt.
- Jede Komponente auf Ebene 2 geht maximal in ein Halbfabrikat ein.
- Die Fertigung auf jeder Stufe beginnt, wenn alle Komponenten und Halbfabrikate vorhanden sind. Dabei ist die Fertigungskapazität unbegrenzt.
- Lagerhaltungskosten entstehen für Komponenten, die vor Beginn der Montage auf Level 2 eintreffen.

Hnainen et al. versuchen die Freigabezeiten bzw. Bestellzeitpunkte der Komponenten auf Ebene 2 so festzulegen, dass folgende Zielfunktionen minimiert werden:

$$\min EC(X), SP(X) \quad (3.1)$$

mit:

$$EC(X) = \text{Erwartete Lagerhaltungskosten} \quad (3.2)$$

$$SP(X) = \text{Fehlmengenquote} \quad (3.3)$$

Die Zielfunktionen wurden dabei analytisch unter Ausnutzung der Annahmen für dieses spezifische System und den Erwartungswerten der Verteilungen abgeleitet¹⁸². Die Zielfunktion aus Formel (3.3) repräsentiert den prozentualen Anteil der nicht rechtzeitig erfüllten Lieferungen, was der Maximierung der Liefertreue des Produkts entspricht.

Durch die Verwendung von zwei Zielfunktionen ist keine eindeutige optimale Lösung direkt bestimmbar, wodurch die Lösungsmethode des Problems die Menge der optimalen Kompromisse hinsichtlich der zwei Ziele ermitteln muss¹⁸³. Aufgrund der Komplexität durch die Interdependenzen setzen die Autoren dazu eine Heuristik, in diesem Fall einen genetischen Algorithmus ein. Dabei wird, wie in Abbildung 3.5 ersichtlich, für jede Komponente auf der zweiten Ebene die jeweilige Freigabezeit als ganzzahliges Gen kodiert. Das weitere Vorgehen entspricht dem in Kapitel 3.3.1.2 vorgestelltem Ablauf eines genetischen Algorithmus.

¹⁸² Dabei wurden die Ableitungen später durch [SFZ12] noch einmal korrigiert.

¹⁸³ Auch Pareto-Menge genannt. Siehe Kapitel 3.3.1.1.

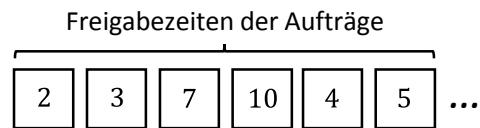


Abbildung 3.5: Kodierung des genetischen Algorithmus

Das Verfahren lässt sich indirekt auch auf eine MRP-Umgebung übertragen. Die ermittelte Freigabezeit für Komponenten auf Ebene 2 in Bezug auf deren Bedarfsdatum entspricht den geplanten Durchlauf- beziehungsweise Wiederbeschaffungszeiten für die jeweiligen Komponenten. Durch die Berücksichtigung der Unsicherheit sind Sicherheitszeiten somit schon indirekt in dieser Zeit enthalten. Des Weiteren ist das Verfahren durch die ganzzahlige Diskretisierung der Entscheidungsvariablen für die Verwendung mit den ebenfalls diskret arbeitenden MRP-Systemen geeignet.

3.2.2.2.2 Verfahren nach Molinder [Moli97]

Molinder hat ein Verfahren entwickelt, das entweder Sicherheitszeiten oder Sicherheitsbestände in mehrstufigen konvergierenden Systemen optimieren kann¹⁸⁴. Für den Einsatz des Verfahren gelten folgende Bedingungen:

- Es können mehrere Produkte mit stochastischem Bedarf existieren.
- Es werden mehrere Perioden betrachtet.
- Die Produktstruktur kann beliebig viele Ebenen umfassen.
- Alle Wiederbeschaffungs- und Durchlaufzeiten sind unsicher, wobei die mathematischen Verteilungen bekannt sind.
- Lagerhaltungskosten entstehen für Komponenten, die früher als benötigt eintreffen.
- Fehlmengenkosten entstehen für Nachfragen nach Produkten, die nicht pünktlich erfüllt werden können.

Die Sicherheitszeiten werden auf Materialebene so ermittelt, dass die durch Formel (3.4) dargestellte Summe der Produktionskosten minimiert wird. Diese setzt sich aus Lagerhaltungskosten, Fehlmengenkosten und Rüstkosten zusammen.

$$\text{Min } C(X) = \text{Lagerhaltungskosten} + \text{Fehlmengenkosten} + \text{Rüstkosten} \quad (3.4)$$

¹⁸⁴ Da jeweils nur eine getrennte Ermittlung möglich ist, wird dieses Verfahren an dieser Stelle für Sicherheitszeiten vorgestellt, gilt aber analog auch für Sicherheitsbestände.

Zur Ermittlung der erwarteten Kosten wird eine diskrete, eventbasierte Simulation verwendet, die für eine spezifische Sicherheitszeitkombination in mehreren Simulationsläufen unter Berücksichtigung der stochastischen Verteilungen die durchschnittlichen Kostenwerte ermittelt.

Die Festlegung der Sicherheitszeitkombination erfolgt mittels simulationsbasierter Optimierung. Als Optimierungsverfahren wird eine Simulated-Annealing-Heuristik eingesetzt¹⁸⁵, die in jeder Iteration eine Lösung ermittelt und durch die Simulation bewerten lässt.

3.2.2.3 Kombinierte Verfahren

Nach Kenntnis des Autors existieren zum aktuellen Zeitpunkt keine für die Strukturen des zuvor beschriebenen Liefernetzwerks geeigneten Verfahren, die simultan Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten ermitteln. Auch Molinder bestimmt diese nur getrennt, weist aber darauf hin, dass durch den kombinierten Einsatz weitere Kostensenkungen ermöglicht werden könnten.

Verschiedene Richtlinien definieren, wann Sicherheitsbestände und wann Sicherheitszeiten zu bevorzugen sind. Dabei ist jedoch keine klare Tendenz festzustellen; einige dazu durchgeführte Studien liefern sogar widersprüchliche Empfehlungen. Whybark und Williams¹⁸⁶ empfehlen Sicherheitszeiten bei zeitlicher Unsicherheit der Nachfrage oder der Beschaffung und Sicherheitsbestände bei vorwiegend mengenmäßigen Abweichungen. Grasso und Taylor¹⁸⁷ hingegen empfehlen in jeder Situation Sicherheitsbestände. Laut Buzacott und Shanthikumar¹⁸⁸ sind Sicherheitszeiten einzusetzen, wenn die zukünftigen Bedarfe genau bekannt sind. Van Kampen et. al¹⁸⁹ sprechen im Fall von unsicheren Bedarfslagen eine Empfehlung für Sicherheitsbestand aus und bei Schwankungen in den Wiederbeschaffungszeiten für Sicherheitszeiten.

¹⁸⁵ Diese bildet einen Abkühlungsprozess nach, bei dem in der Realität Atome durch langsame Abkühlung einen stabilen Zustand erreichen. Vgl. [Ólaf06], S. 637.

¹⁸⁶ [WW76].

¹⁸⁷ [GT84].

¹⁸⁸ [BS94].

¹⁸⁹ [KDZ10].

3.2.2.4 Einordnung und Bewertung der Verfahren

An dieser Stelle erfolgt eine Bewertung der Verfahren hinsichtlich der Eignung für die Problemstellung, sowie eine Einordnung der verwendeten Methoden. In Tabelle 3.1 sind die Verfahren mit ihren wichtigsten Eigenschaften zusammengefasst.

Die Ermittlung der Auswirkung von Sicherheitsbeständen auf das Servicelevel durch Jung et al. sowie Ünlü und Rossetti zeigt eine Möglichkeit auf, um mittels simulationsbasierter Optimierung auch komplexe Liefernetzwerke mit nicht-linearen Zusammenhängen zu evaluieren. Jung et al. betrachten jedoch nur die Produkte auf oberster Ebene und keine Interdependenzen durch gemeinsame Komponenten¹⁹⁰. Da diese im vorliegenden Szenario mit berücksichtigt werden müssen, können die Materialien nicht mehr unabhängig voneinander vorberechnet werden, weil die verwendeten einfachen Verrechnungsfunktionen nicht anwendbar sind. Dadurch ergibt sich eine hohe Anzahl an Kombinationen, die nicht mehr effizient offline vorberechnet werden kann. Beide Verfahren berechnen nur einen statischen anstatt einen dynamischen Sicherheitsbestand. Wegen der unzureichenden Berücksichtigung von projektspezifischen Materialien besteht das Risiko, dass entsprechende Materialien nach Projektende noch im Lager verbleiben.

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der Verfahren

Quelle	Ziele	Umgebung	Produkte / Stufen	Lösungsansatz
Sicherheitsbestandsverfahren				
Jung et al.	Min Lagerhaltungskosten + Verzugskosten + Servicelevel Strafkosten	MTS	Multi / Multi	Lineares Optimierungsmodell mit offline Linearisierung durch simulationsbasierte Optimierung
Ünlü und Rossetti	Nicht anwendbar (Ermittlung benötigter Sicherheitsbestand für spezifisches Servicelevel)	MTS	1 / 1	Simulationsbasierte Optimierung
Sicherheitszeitverfahren				
Hnainen et al.	Min Lagerhaltungskosten Max Liefertreue	MTO, MRP indirekt	1 / 2	Genetischer Algorithmus mit mathematischen Ableitungen
Molinder	Min Lagerhaltungskosten + Fehlmengenkosten + Rüstkosten	MTO, MRP	Multi / Multi	Simulationsbasierte Optimierung mit Simulated Annealing

Im Bereich der Sicherheitszeiten zeigen Hnainen et al. mit dem Einsatz der genetischen Algorithmen eine Möglichkeit auf, mehrere Ziele gleichzeitig zu verfolgen, was sich für die Multi-Projektbetrachtung eignet. Die verwendeten mathematischen Ableitungen sind

¹⁹⁰ Ünlü und Rossetti betrachten sogar nur eine Stufe und ein Produkt.

jedoch nicht auf größere Netzwerke anwendbar. Dies wird bei Molinder durch den Einsatz von simulationsbasierter Optimierung umgangen, wobei diese in Kombination mit einwertiger Zielverfolgung durch die Simulated-Annealing-Heuristik erfolgt. Beiden Ansätzen gemein ist jedoch, dass die Sicherheitszeiten immer je Material ermittelt werden und somit für alle Aufträge gleich sind. An dieser Stelle ist insbesondere bei einer Mehrzieloptimierung eine weitere Differenzierung nach Aufträgen wünschenswert.

Kein Verfahren deckt alle Anforderungen ab, insbesondere existiert bisher keine kombinierte Planung von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten. Jedoch lassen sich aus den vorgestellten Verfahren allgemeine Erkenntnisse ableiten.

Aufgrund der hohen Komplexität bei mehreren Materialien und mehrstufiger Positionierung ist zur Evaluierung der Auswirkungen auf die Liefertreue der Einsatz von Metaheuristiken sinnvoll¹⁹¹. Diese ermitteln zwar kein garantiertes Optimum, allerdings für die Praxis hinreichend gute Lösungen. Dabei eignen sich die genetischen Algorithmen auch zur Erfüllung der Anforderung der Mehrzieloptimierung.

Des Weiteren sind in komplexen Netzwerken keine mathematischen Ableitungen der Liefertreue in Abhängigkeit von Sicherheitsbeständen oder -zeiten mehr möglich. Um realistische Werte für ein individuelles Liefernetzwerk zu erhalten, wird in den meisten Fällen Simulation eingesetzt¹⁹². Wichtig ist jedoch die korrekte Implementierung der Simulation, insbesondere hinsichtlich der MRP-Logik. Viele Verfahren bilden Teile der MRP-Logik in der Simulationsumgebung nach, was zu Abweichungen von der real verwendeten Logik führen kann. Koh und Saad¹⁹³ haben in ihren Studien zwei typische Fehler identifiziert. Zum einen werden übergeordnete Planaufträge zu früh ausgeführt, insbesondere wenn die dafür notwendigen Bedarfe früher als geplant eintreffen. Dies ist in MRP-getriebenen Systemen jedoch nicht vorgesehen. Zum anderen existieren Fälle, in denen übergeordnete Aufträge trotz Fehlteilen gestartet werden. Um diesen Abbildungsfehlern vorzubeugen, schlagen die Autoren vor, die Planauftragsgenerierung aus der Simulation auszulagern. Diese sollte im Optimalfall von dem System durchgeführt werden, dass später die realen MRP-Pläne erzeugt. Zusätzlich sollten in der Simulation für jeden Planauftrag Vorgänger- und Nachfolgerinformationen¹⁹⁴ gepflegt werden. Diese dienen dazu, dass Nachfolger-Planaufträge erst starten können, wenn alle Vorgängeraufträge erfüllt

¹⁹¹ Schon das dadurch entstehende Sicherheitsbestands-Positionierungsproblem ist NP-hart. Siehe [SAD+08].

¹⁹² Vgl. [CC02], S. 1063 und [DAV10], S. 5770.

¹⁹³ [KS04] und [KS03].

¹⁹⁴ Als Vorgänger oder Kind werden Planaufträge bezeichnet, die z. B. für einen Produktionsauftrag die benötigten Materialien zuliefern. Nachfolger sind dann entsprechend die Planaufträge, für die ein Planauftrag zuliefert.

sind, ansonsten werden sie in eine Warteschlange eingereiht. Sind dann alle Vorgänger ausgeführt und ist die Ausführungszeit größer bzw. gleich der geplanten Ausführungszeit, kann der Nachfolge-Planauftrag in der Simulation gestartet werden.

3.3 Mehrzieloptimierung unter Unsicherheit

Optimierungsmodelle lassen sich anhand der Anzahl der Extremierungsziele in ein- und multikriterielle Modelle unterteilen. Die Art der Berücksichtigung der Unsicherheit entscheidet darüber, ob diese Modelle deterministisch oder stochastisch sind¹⁹⁵. Aufgrund der Multi-Projektbetrachtung der Liefertreue und der vorhandenen Unsicherheit, werden Lösungsmethoden für ein multikriterielles, stochastisches Problem benötigt.

Einkriterielle Optimierungsprobleme sind definiert durch Lösungsvektoren aus einem Lösungsraum $\bar{x} \subseteq \mathbb{R}^n$, die mittels einer Zielfunktion $f: \bar{x} \rightarrow y$ auf Elemente eines eindimensionalen Zielraums $y \subseteq \mathbb{R}^1$ abgebildet werden. Bei Betrachtung mehrerer Ziele ist der Lösungsraum ebenfalls mehrdimensional, was zu einem Zielfunktionsvektor \bar{f} führt. Daraus ergibt sich folgende allgemeine Form eines zu maximierenden Mehrzieloptimierungsproblems mit N Zielen, wobei S den zulässigen Bereich des Lösungsraums \mathbb{R}^n repräsentiert und durch Restriktionen definiert wird¹⁹⁶:

$$\max \bar{f}(\bar{x}) = (f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_n(\bar{x})) \quad \text{mit } n = 1, \dots, N \quad (3.5)$$

$$\text{u. d. N. } \bar{x} \in S \quad (3.6)$$

Stehen die Ziele wie im vorgegebenen Problem in Konkurrenz zueinander, ist ein einfacher Vergleich der Lösungen mittels *max* oder *min* Funktionen wie bei eindimensionalen Modellen nicht mehr geeignet für die Ermittlung einer einzigen optimalen Lösung. Dies ist zwar für jede Zielfunktion individuell, aber nicht bei der Betrachtung aller Zielfunktionen möglich, da dann eine Verbesserung in einem Zielwert zur Verschlechterung der Zielerfüllung bei mindestens einem anderen Ziel führt¹⁹⁷. Zur Lösung multikriterieller Modelle können folgende Ansätze verwendet werden¹⁹⁸:

1. Dominanzkonzepte

Die Menge der gültigen Lösungen kann reduziert werden, indem dem Entscheider nur die effizienten Lösungen daraus vorgelegt werden. Eine Lösung x^1 ist effizient, wenn keine andere Lösung x^2 existiert, die in keinem Ziel schlechter und

¹⁹⁵ Siehe [KS11], S. 45 f.

¹⁹⁶ Vgl. [Talb09], S. 310.

¹⁹⁷ Siehe [AIK+08], S. 38 f.

¹⁹⁸ Vgl. [KS11], S. 347–404 und [DD05], S. 55–59.

für mindestens ein Ziel besser bewertet wird¹⁹⁹. Existiert eine solche Lösung x^2 , so dominiert diese x^1 . Mittels der effizienten Menge kann ein Planer dann die tatsächlichen Trade-offs hinsichtlich der Leistungsfähigkeit zwischen den Zielen erkennen und sich anhand seiner Präferenzen a posteriori für eine spezifische Lösung entscheiden. Dies kann für eine übersichtliche Menge mit wenigen Zielen manuell durchgeführt werden, wobei der Auswahlprozess durch grafische Gegenüberstellungen beschleunigt werden kann.

2. Ersatzkriterien

Diese auch als Kompromissmodell bezeichnete Vorgehensweise bildet implizit die Präferenzen des Planers bezüglich der Ziele ab. Dabei werden die individuellen Zielfunktionen durch eine verknüpfende Meta-Zielfunktion Ψ ersetzt, die die optimale Kompromisslösung ermittelt. Dafür müssen auf Seite des Planers grundlegende Kenntnisse über die Möglichkeiten und Beschränkungen des Problemreichs vorhanden sein, da die Angaben zu den Präferenzen a priori, also vor dem Optimierungsprozess, erfolgen. Beispiele für diesen Ansatz sind Zieldomianz (nur das wichtigste Ziel wird berücksichtigt), lexikografische Ordnung (Ziele werden in einer spezifischen Reihenfolge berücksichtigt), Zielgewichtung und Goal Programming (Zielwerte werden vorgegeben).

3. Multiattributive Methoden

Als dritte Möglichkeit können die Präferenzen explizit ermittelt werden. Dazu wird eine multiattributive Gesamtnutzenfunktion bestimmt. Bekannte Methoden sind beispielsweise die Nutzwertanalyse oder der Analytic Hierarchy Process²⁰⁰.

Der Unterschied zwischen einer Spezifikation der Präferenzen a priori zu a posteriori zum Mehrzieloptimierungsprozess wird in Abbildung 3.6 grafisch dargestellt. Werden die Informationen a posteriori spezifiziert, so werden die Präferenzen erst auf die effiziente Menge angewandt beziehungsweise anhand dieser Menge spezifiziert. Bei einer a priori Spezifikation entfällt dieser Schritt.

¹⁹⁹ Siehe [DS05], S. 56.

²⁰⁰ Für weiterführende Informationen siehe [Zopo10].

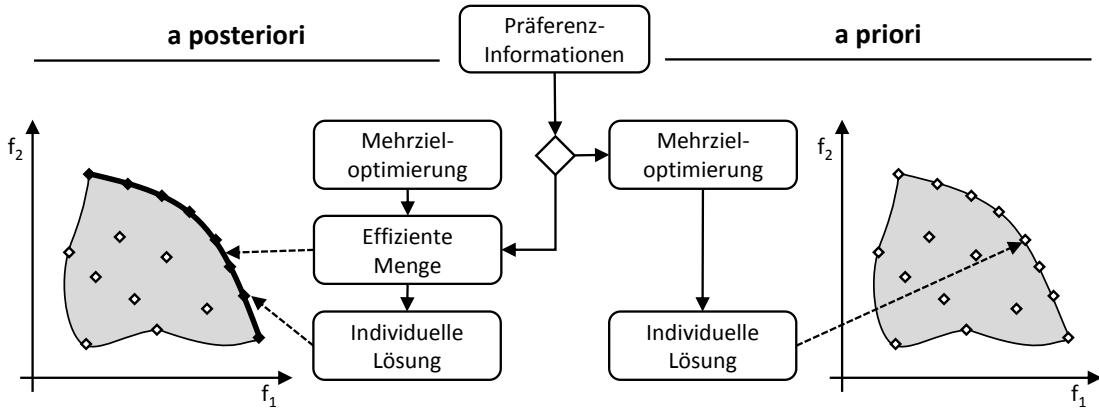


Abbildung 3.6: Berücksichtigungszeitpunkte der Präferenzen²⁰¹

Der Aufwand für den Planer steigt dabei von den Dominanzkonzepten über die Kompromissmodelle bis hin zu den multiattributiven Verfahren stark an, da eine immer höhere Mitwirkung und Einarbeitung notwendig ist. Da mögliche Planungsverfahren zur Lösung der Problemstellung regelmäßig angewandt werden und der Zeitaufwand für den Entscheider mit steigender Zielanzahl ebenfalls noch weiter steigt, werden nachfolgend nur noch Dominanzkonzepte und Ersatzkriterien genauer betrachtet²⁰².

Der zweite Aspekt des vorliegenden Modells, die Unsicherheit, lässt sich wie folgt berücksichtigen²⁰³:

- **Einwertige Berücksichtigung:**

Bei den einwertigen Ansätzen wird die Unsicherheit nicht mehr im Rahmen des Modells betrachtet, sondern die unsichereren Parameter werden vor oder nach der Optimierung entsprechend berücksichtigt. Dazu werden diese durch einen deterministischen Wert, beispielsweise den Erwartungswert, ersetzt. Das überführt die Modelle in deterministische Optimierungsmodelle, wobei jedoch Informationsverluste hingenommen werden müssen.

- **Mehrwertige Berücksichtigung**

Hierbei werden alle Ausprägungen der unsicheren Parameter berücksichtigt. Dies kann bei regelmäßigen Abweichungen um einen Mittelwert, beispielsweise Schwankungen der Wiederbeschaffungszeiten, in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet werden. Sporadische oder einmalige Störungen lassen

²⁰¹ In Anlehnung an [FG10], S. 293 f.

²⁰² Aus demselben Grund wurde an dieser Stelle auch die Lösungsvariante durch iterative Verfahren – Präferenzbestimmung und Optimierung wechseln sich dabei verzahnt ab – ausgelassen.

²⁰³ Siehe [KS11], S. 184 und [Gebh09], S. 26–31.

sich aufgrund unzureichender Informationen besser über Szenarien, wie beispielsweise verschiedene Bedarfsszenarien oder Worst-Case-Szenarien, modellieren.

In den Unterkapiteln 3.3.1 und 3.3.2 werden Verfahren zur Generierung der effizienten Menge mittels Dominanzkonzepten, der manuellen Lösungsselektion aus einer effizienten Menge sowie das Goal Programming als Vertreter der Kompromissmodelle vorgestellt. In Unterkapitel 3.3.3 wird ein Ansatz zur mehrwertigen Berücksichtigung von Unsicherheit durch die Kopplung von Optimierung und Simulation vorgestellt.

3.3.1 Ermittlung der effizienten Alternativen

Dominanzbasierte Methoden, die die Menge der effizienten Alternativen berechnen, können entweder exakt oder heuristisch arbeiten. Es existieren jedoch nur für kleinere Probleme mit maximal zwei Zielen exakte Verfahren, sodass viele reale Problemstellungen damit nicht lösbar sind. In solchen Fällen werden Heuristiken eingesetzt, die zwar keine garantiert optimale Lösung, dafür eine hinreichende gute Lösung bei vertretbarem Rechenaufwand liefern können²⁰⁴. Dies entspricht einer Approximation der effizienten Menge. Als geeignetes Verfahren aus der Klasse der Metaheuristiken²⁰⁵ werden nachfolgend die evolutionären Algorithmen vorgestellt. Zuvor erfolgt eine Definition der benötigten Grundbegriffe.

3.3.1.1 Grundlegende Definitionen

Um Mehrziel-Lösungen miteinander zu vergleichen, wird die Pareto-Dominanz als Vergleichsoperator verwendet. Dabei dominiert im Maximierungsfall eine Lösung \bar{x}^1 eine andere Lösung \bar{x}^2 , geschrieben $\bar{x}^1 > \bar{x}^2$, wenn gilt²⁰⁶:

$$\exists n \in \{1 \dots N\}: f_n(\bar{x}^1) > f_n(\bar{x}^2) \wedge \forall n \in \{1 \dots N\}: f_n(\bar{x}^1) \geq f_n(\bar{x}^2) \quad (3.7)$$

Daraus lässt sich die Definition der Pareto-Optimalität einer Lösung \bar{x}^* ableiten. Diese ist Pareto-optimal, wenn, wie in Formel (3.8) definiert, keine andere gültige Lösung \bar{x}^* dominiert.

$$\forall \bar{x}^s \in S: \bar{x}^s \not> \bar{x}^* \quad (3.8)$$

²⁰⁴ Siehe [Scho01], S. 62.

²⁰⁵ Bei einer Meta-Heuristik ist die Funktionsweise unabhängig vom eigentlichen Problem. Siehe [DHS03], S. 6.

²⁰⁶ Formeln siehe [FG10], S. 291 f. und [Talb09], S. 311.

Da in realen Mehrzieloptimierungsproblemen die Lösung mit den maximalen Zielfunktionswerten für jedes Ziel meist nicht zulässig ist, resultiert dies in einer effizienten Lösungsmenge mit mehreren, nicht dominierten Lösungen. Diese Menge wird als Pareto-Menge \mathcal{P}^* bezeichnet.

$$\mathcal{P}^* = \{\bar{x} \in S / \nexists \bar{x}' \in S, \bar{x}' \succ \bar{x}\} \quad (3.9)$$

Das Abbild der Pareto-Menge im Zielfunktionsraum ist die Pareto-Front \mathcal{F}^* :

$$\mathcal{F}^* = \{\bar{f}(\bar{x}), \bar{x} \in \mathcal{P}^*\} \quad (3.10)$$

Die effiziente Menge aus Abbildung 3.6 entspricht also der Pareto-Front \mathcal{F}^* und die zu gehörigen Lösungsvektoren zu \mathcal{F}^* bilden die Menge \mathcal{P}^* .

3.3.1.2 Evolutionäre Algorithmen

Zurzeit können nur Metaheuristiken wie beispielsweise Simulated Annealing, Partikel-schwarmoptimierung oder evolutionäre Algorithmen komplexere reale Mehrzielprobleme lösen. Diese Heuristiken lassen sich zudem einfach mit anderen Verbesserungstechniken kombinieren und sind dabei in der Lage, mehrere Ziele simultan zu berücksichtigen. An dieser Stelle werden die evolutionären Algorithmen zur Lösung des Problems vorgestellt, da diese in der Praxis bei der erfolgreichen Lösung der entsprechenden Mehrzielprobleme am weitesten verbreitet sind²⁰⁷. Zusätzlich profitiert die Mehrzielbetrachtung besonders vom verwendeten populationsbasierten Ansatz, durch den mehrere Lösungen und somit auch mehrere Regionen des Lösungsraums gleichzeitig untersucht werden. Dadurch sind die evolutionären Algorithmen auch bei nicht konvexen Lösungsräumen anwendbar.

Den Ursprung dieser Algorithmen bilden die biologische Evolution und die Evolutions-theorie nach Darwin. Die Grundprinzipien orientieren sich am ständig ablaufenden Evolutionsprozess, bei dem fortlaufend Anpassungen zur verbesserten Adaption an die Umwelt erfolgen, wobei die jeweils besser angepassten Individuen überleben. In Tabelle 3.2 werden die Begrifflichkeiten mit denen der klassischen Optimierung gegenübergestellt:

²⁰⁷ Vgl. [FG10], S. 288, [DBX06], S. 614. und [CC05], S. 662.

Tabelle 3.2: Bedeutung der evolutionären Begrifflichkeiten

Evolutionärer Begriff	Optimierung
Evolution	Problemlösung
Population	Lösungsmenge
Gen	Entscheidungsvariable
Individuum	Lösung
Fitness	Zielfunktionswert

Es existieren verschiedene Verfahrensklassen unter dem Schlagwort evolutionäre Algorithmen, die aber bezüglich der Basis identisch sind. Im Folgenden werden die genetischen Algorithmen als Hauptvertreter vorgestellt²⁰⁸. Diese arbeiten mit einer kodierten Repräsentation des Problems, dem Chromosom. Dieses wird auch als Genotyp bezeichnet und seine Abbildung auf das angewandte Problem als Phänotyp.

Der Ablauf erfolgt wie in Abbildung 3.7 dargestellt²⁰⁹. Zunächst wird eine Ausgangspopulation erstellt. Jedes Individuum wird bezüglich seiner Fitness, sprich der Zielfunktionswerte, eingestuft. Anschließend erfolgt eine Reproduktionsphase, in der mehrfach aus der Ausgangspopulation Individuen ausgewählt, durch ein Crossover-Verfahren rekombiniert und die resultierenden Nachkommen durch Mutation verändert werden. Die resultierende Nachfolgergeneration wird erneut hinsichtlich ihrer Fitness bewertet. Ist kein Haltekriterium erfüllt, wird anhand der Nachfolgerpopulation und deren Ausgangspopulation die nächste Ausgangspopulation bestimmt und der Ablauf beginnt erneut. Alle Operationen, abgesehen von der Fitnessbewertung, erfolgen auf dem Chromosom.

²⁰⁸ Weitere Klassen sind Evolutionsstrategien sowie evolutionäre und genetische Programmierung.

²⁰⁹ Siehe [Talb09], S. 199–204 und [BMZ01], S. 60f.

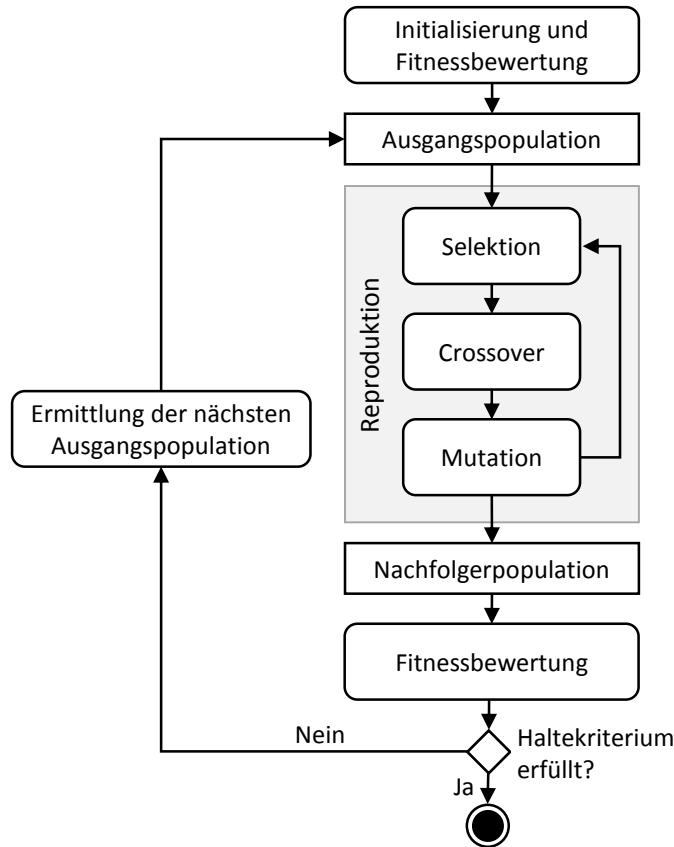


Abbildung 3.7: Ablaufschema eines genetischen Algorithmus

Zur Anwendung eines genetischen Algorithmus müssen folgende Komponenten definiert werden²¹⁰:

1. **Repräsentation:** Es ist eine für das Problem geeignete Abbildung auf ein Chromosom zu entwickeln.
2. **Initialisierung:** Die verwendete Methode zur Initialisierung der ersten Ausgangspopulation muss definiert werden.
3. **Ziele & Fitnessbewertung:** Es muss eine Funktion zur Ermittlung der Zielwerte angegeben werden.
4. **Selektionsstrategie:** Die Definition der Selektionsstrategie legt fest, welche Individuen aus der Ausgangspopulation ausgewählt werden, um in die Reproduktion einzugehen.
5. **Reproduktionsstrategie:** Es müssen für die Repräsentation geeignete Crossover- und Mutationsoperatoren definiert werden.
6. **Haltekriterien:** Die Haltekriterien geben an, wann der Suchprozess gestoppt werden soll.

²¹⁰ Vgl. [Talb09], S. 205.

Bei der Lösung eines Mehrziel-Optimierungsproblems sollen evolutionäre Algorithmen eine möglichst gute Approximation der exakten Pareto-Front liefern. Dabei sollten die Lösungen der approximierten Front gleichmäßig im Lösungsraum verteilt sein, um die resultierenden Trade-Offs möglichst vollständig abzubilden²¹¹.

Für den praktischen Einsatz existieren viele verschiedene Implementierungen von genetischen Verfahren, die sich insbesondere hinsichtlich der Fitnessbewertung und der Ermittlung der nächsten Ausgangspopulation unterscheiden. Ein gut getesteter und effizienter Algorithmus ist der Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA-2)²¹². Bei der Ermittlung der Lösungen für die jeweils nächste Generation wird dabei das Konzept der Pareto-Dominanz angewandt. Zusätzlich wird ein externes Lösungsarchiv verwaltet, das zu jedem Zeitpunkt eine Auswahl der bisher nicht dominierten Individuen enthält. Dies wird als Elitismus bezeichnet. Dabei wird über spezielle Abstandsverfahren die Diversität der Lösungen innerhalb des Archivs sichergestellt²¹³.

3.3.2 Eindeutige Lösungsauswahl

Wird ein dominanzbasiertes Verfahren zur Mehrzieloptimierung eingesetzt, so muss im Anschluss eine individuelle Lösung aus der resultierenden Pareto-Menge gewählt werden. Bei Kompromissverfahren müssen a priori Präferenzen festgelegt werden, um eine eindeutige Lösung zu erhalten. In den folgenden Unterkapiteln werden geeignete Verfahren für beide Schritte vorgestellt.

3.3.2.1 Vorgabe von Zielwerten durch Goal Programming

Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist es im Praxisumfeld üblich, eine im Mittel zu erreichende taktische Zielvorgabe für wichtige Kennzahlen vorzugeben. Bezogen auf die Liefertreue muss diese nicht einfach nur maximiert werden, sondern sollte das vorgegebene Anspruchsniveau einhalten. Solche Ziele bezeichnet man auch als Approximationsziele.

Zur Abbildung entsprechender Vorgaben eignet sich das Goal Programming, bei dem die Grundidee die Minimierung der Abweichungen der zulässigen Lösungen von zuvor definierten Ziellinien aus ist, wodurch die Approximationsziele in ein Extremierungsziel überführt werden²¹⁴.

²¹¹ Siehe [FG10], S. 295.

²¹² Siehe [Talb09], S. 337–341 und [ZLT02].

²¹³ Siehe [Coel05], S. 11–16.

²¹⁴ [KS11], S. 102–104.

Die Gestaltung der Meta-Zielfunktion Ψ ist dabei abhängig von den Zieleigenschaften²¹⁵. Das Verhältnis von der Zielvorgabe t_i für Ziel i zur Zielfunktion f_i sei wie folgt:

$$f_i(\bar{x}) + n_i - p_i = t_i \quad (3.11)$$

Die negative Abweichung, also die Unterschreitung des Zielwerts, wird durch n_i angegeben und die Überschreitung durch p_i . Gilt für ein Ziel „je mehr, desto besser“, werden nur die Unterschreitungen betrachtet, im umgekehrten Fall nur die Überschreitungen. Soll eine Zielvorgabe exakt eingehalten werden, werden beide Variablen betrachtet. Damit lassen sich folgende Metazielfunktionen konstruieren:²¹⁶

L_1 Metrik: Minimiere die Summe aller absoluten Abweichungen

$$\min \Psi_{L_1}(\bar{x}) = \sum_i (n_i + p_i) \quad (3.12)$$

Maximum Metrik: Minimiere die größte Abweichung

$$\min \Psi_{L_1}(\bar{x}) = \max_i (\max_i n_i, \max_i p_i) \quad (3.13)$$

Bei unterschiedlichen Größenordnungen der Ziele können diese zusätzlich durch die Multiplikation mit Zielgewichten angepasst werden. Alternativ können Zielerreichungsgrade eingesetzt werden.

Als Kompromissmethode lässt sich das Goal Programming wie in Abbildung 3.6 dargestellt a priori auf ein Mehrzieloptimierungsproblem anwenden. Die Methode kann aber auch zur Lösungsauswahl aus einer bereits effizienten Menge eingesetzt werden.

3.3.2.2 Unterstützende Verfahren zur manuellen Lösungsauswahl

Wenn ein Planer manuell aus einer Pareto-Menge eine Lösung auswählt, so ist dies nur für wenige Ziele und Lösungen ohne weitere Hilfsmaßnahmen möglich. Existieren viele Lösungen oder Ziele, kann der Prozess durch entsprechende Unterstützungsverfahren beschleunigt werden. Dazu existieren neben der klassischen tabellarischen Darstellungsform verschiedene unterstützende Visualisierungen. In Klöpper et al.²¹⁷ sind diese zu einem Auswahlverfahren kombiniert worden, das aufgrund seines Fokus auf einem späteren Einsatz im Produktionsumfeld, für den Einsatz im gegebenen Szenario besonders geeignet ist. Der Auswahlprozess läuft nach dem Schema in Abbildung 3.8 ab.

²¹⁵ Vgl. [GR10], S. 313.

²¹⁶ Siehe [MS09], S. 121 f. und [DS05], S. 58 f.

²¹⁷ [KHP+11].

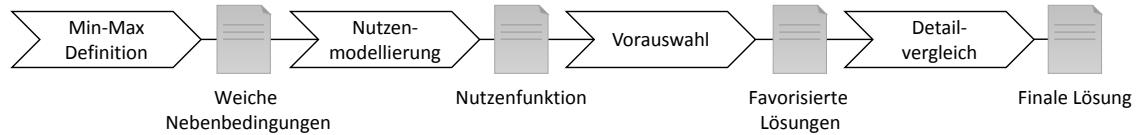


Abbildung 3.8: Lösungsauswahl-Prozess²¹⁸

Zuerst können Ober- und Untergrenzen für jedes Ziel definiert werden²¹⁹. Im Anschluss erfolgt eine Modellierung der Nutzenfunktion²²⁰ mittels unterstützter Zielgewichtung. Die erzeugte Nutzenfunktion wird zur Sortierung der effizienten Menge verwendet, wobei verschiedene grafische Darstellungen den Vergleich und die Favorisierung von individuellen Lösungen vereinfachen. Abbildung 3.9 zeigt die Auswahlumgebung. Favorisierte Lösungen werden in Abschnitt 1 gelistet und alle verbleibenden Lösungen, nach Nutzwert sortiert, in Abschnitt 2 aufgeführt. Jede Spalte repräsentiert ein Ziel und der Zellwert gibt den erreichten Wert je Lösung an. Erfüllt eine Lösung nicht die zuvor definierten Anforderungen, so wird diese grau und die verletzten Zielwerte in Rot dargestellt. Dadurch werden diese Lösungen nicht vollständig vom Entscheidungsprozess ausgeschlossen. Für einen schnellen visuellen Vergleich von zwei oder mehr Lösungen, können diese in einem Radardiagramm (Abschnitt 3) übereinandergelegt werden.

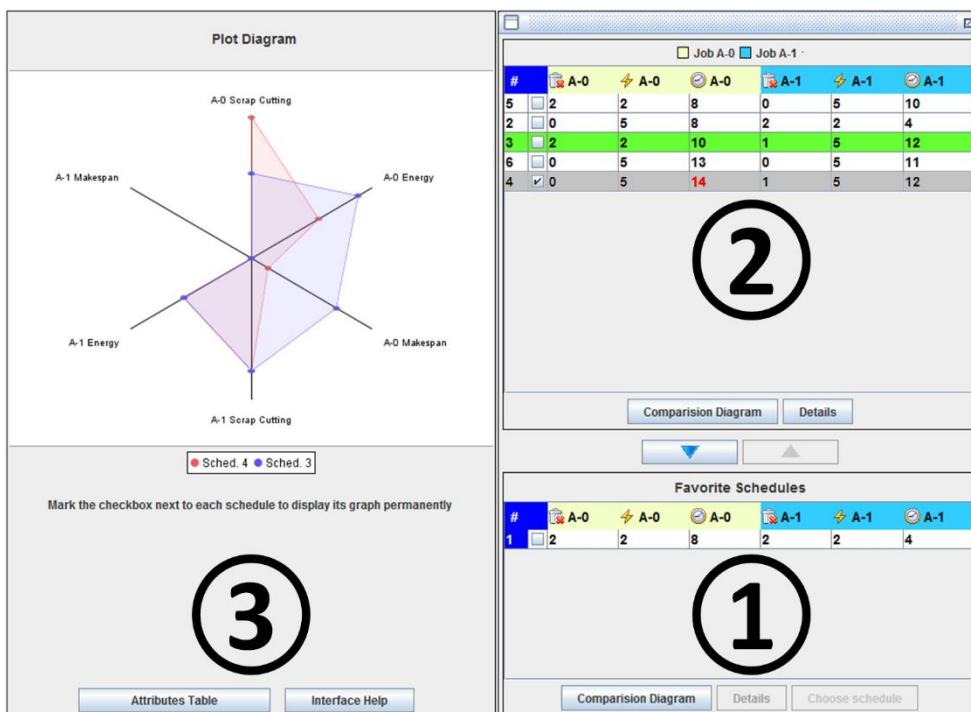


Abbildung 3.9: Auswahlinterface

²¹⁸ Aus ebd..

²¹⁹ Dadurch werden einzuhaltende Satisfizierungsziele vorgegeben.

²²⁰ Diese entspricht einer Meta-Zielfunktion.

Das Auswahlverfahren ermöglicht eine effiziente Identifikation einer präferierten Lösung durch den strukturierten Vergleich von mehreren Lösungen einer effizienten Menge. Durch die verschiedenen Sortierungs- und Visualisierungsmöglichkeiten der Zielwerte eignet sich das Verfahren insbesondere für die durch die Multi-Projekt-Betrachtung entstehenden Mehrzielanforderungen.

3.3.3 Simulationsbasierte Optimierung

Zur Abbildung von Unsicherheit in komplexen Optimierungsmodellen wird in der Praxis oftmals Simulation eingesetzt. Diese ist auch auf Probleme anwendbar, die aufgrund von nicht-linearen Sachverhalten, stochastischen Einflüssen oder dynamischen Abhängigkeiten der Systemkomponenten nicht analytisch lösbar sind²²¹. Im Folgenden wird zunächst der allgemeine Ablauf der im Bereich der Produktion und Logistik vorwiegend eingesetzten diskreten, eventbasierten Simulation vorgestellt²²². Diese eignet sich aufgrund der ähnlichen Voraussetzungen und Betrachtungsweisen gut zur Simulation von ebenfalls diskreten MRP-Plänen. Anschließend werden aufgrund des erfolgreichen Einsatzes bei den Verfahren zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten die Kopplungsmöglichkeiten von Optimierung und Simulation aufgezeigt.

3.3.3.1 Diskrete, eventbasierte Simulation

In der VDI-Norm 3633 wird Simulation definiert als „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden Prozesse über die Zeit entwickelt“²²³. Ein Modell ist dabei die Nachbildung eines existierenden oder zu planenden Systems, wobei in Zusammenhang mit Simulation vorwiegend homomorphe Modelle erstellt werden. Diese enthalten Vereinfachungen gegenüber dem ursprünglichen System durch Abstraktion und Vernachlässigung von irrelevanten Objekten und Beziehungen für den jeweiligen Untersuchungsgegenstand²²⁴.

²²¹ Siehe [MS09], S. 280 und [AIK+08], S. 91.

²²² Vgl. [RM11], S. 14.

²²³ [VDI3633].

²²⁴ Siehe [AIK+08], S. 73 f. und [DS05], S. 30–39.

Simulationsmodelle lassen sich anhand mehrerer Eigenschaften klassifizieren²²⁵. Dabei sind in der Produktion und Logistik überwiegend diskrete, dynamisch-stochastische Modelle im Einsatz. Diese betrachteten das zeitliche Verhalten eines Systems unter stochastischen Einflüssen (Unsicherheit), wobei die Modellierung der Zeit mittels diskreter Zeitpunkte, zu denen die Zustandsänderungen jeweils erfolgen, stattfindet. Werden die betrachteten Zeitpunkte in Abhängigkeit der zukünftigen Ereignisse gewählt, spricht man von eventbasierter Simulation²²⁶.

Solche Systeme enthalten üblicherweise folgende Komponenten²²⁷:

- **Zustandsvariablen:** Beschreiben das System zu einem Zeitpunkt.
- **Statistikvariablen:** Enthalten statistische Informationen zum Systemverhalten.
- **Simulationsuhr:** Bestimmt den aktuell betrachteten Zeitpunkt.
- **Ereignisliste:** Zeitlich sortierte Liste mit zukünftigen Ereignissen, an denen Zustandsänderungen erfolgen.
- **Ereignisroutinen:** Werden bei Aufruf des jeweiligen Ereignisses ausgelöst und ändern Variablen. Können weitere Ereignisse erzeugen.

Die Ablaufsteuerung erfolgt nach dem in Abbildung 3.10 dargestellten Schema:

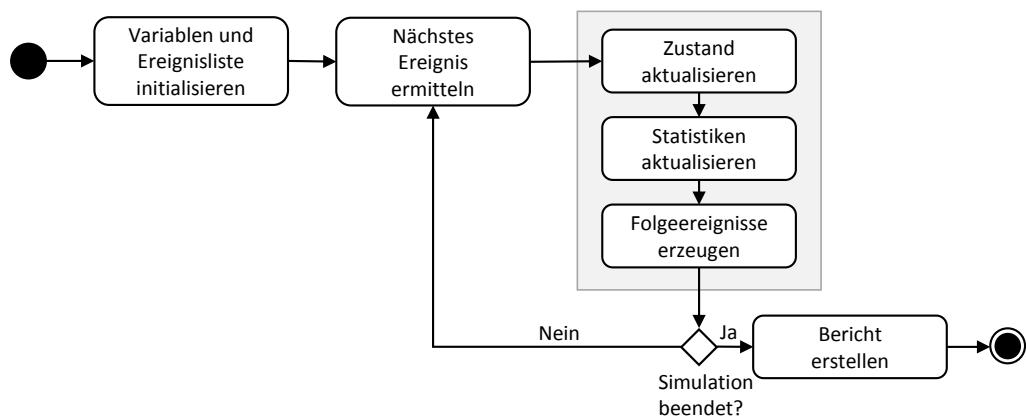


Abbildung 3.10: Ablaufschema einer ereignisorientierten Simulation²²⁸

Zunächst erfolgt eine Initialisierung der Simulationsumgebung, nach der das erste Ereignis ermittelt und die Simulationsuhr auf die entsprechende Zeit vorgestellt wird. Anhand der Ereignisroutine werden dann Zustandsvariablen und Statistikvariablen entsprechend aktualisiert und gegebenenfalls Folgeereignisse erzeugt. Existieren noch weitere Ereignisse in der Ereignisliste, so wird das als nächstes auszuführende Ereignis ermittelt und

²²⁵ [Law14], S. 3–6.

²²⁶ Siehe [DD05], S. 224 f.

²²⁷ Siehe [Law14], S. 9–12 für eine vollständige Übersicht.

²²⁸ Aus [RM11], S. 16.

der Ablauf startet erneut. Ist die Ereignisliste leer, werden Ausgabestatistiken erstellt und die Simulation terminiert²²⁹.

Ziel der meisten stochastischen Simulationsexperimente ist die Ermittlung der Erwartungswerte untersuchter Variablen. Ein individueller Simulationslauf kann dabei als deterministische Funktion dargestellt werden²³⁰:

$$Y_r = f_y(\bar{x}, \overline{\varphi_{\text{in}}}, \overline{\sigma_{\text{en}}}) \quad (3.14)$$

Dabei stellt Y_r den Wert der untersuchten Variable y im r -ten Simulationslauf dar. Das Ergebnis der Simulationsfunktion ist dabei abhängig von drei Eingabevektoren. Vektor \bar{x} enthält Variablen, die der Kontrolle des Planers unterliegen. Vektor $\overline{\varphi_{\text{in}}}$ beschreibt die stochastischen Eingabeparameter, wie beispielsweise Verteilungen für Durchlaufzeiten. Die gegebenen Rahmenbedingungen werden durch Vektor $\overline{\sigma_{\text{en}}}$ repräsentiert. Eine Abschätzung des Erwartungswertes kann dann beispielsweise durch das arithmetische Mittel erfolgen²³¹:

$$E(Y) = \frac{1}{\tau} \times \sum_{r=1}^{\tau} Y_r \quad (3.15)$$

Aufgrund der stochastischen Einflüsse steigt sich die Qualität des Schätzwertes mit der Anzahl der durchgeführten Simulationsläufe τ .

Die Modellierung der stochastischen Eingabeparameter kann durch Zufallsvariablen mit theoretischen oder empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen erfolgen. Im empirischen Fall werden real beobachtete Daten genutzt und in eine approximative Verteilungsfunktion überführt²³².

3.3.3.2 Simulation als Bewertungsfunktion

Simulation ermöglicht die Leistungsbewertung von Parametereinstellungen in komplexen Systemen unter Berücksichtigung von stochastischen Einflüssen. Die Suche nach „guten“ Parametern sollte jedoch zielgerichtet gestaltet und gesteuert werden, beispielsweise durch Optimierungsverfahren²³³. Die Vorteile beider Verfahren lassen sich durch eine Kopplung kombinieren. Dies wird als simulationsbasierte Optimierung bezeichnet,

²²⁹ Vgl. [HN06], S. 4–8.

²³⁰ Vgl. [Chic06], S. 227.

²³¹ Siehe [MS09], S. 293 f.

²³² Siehe ebd., S. 287 f.

²³³ Siehe [EZ12], S. 1.

wobei verschiedene Kopplungsmöglichkeiten existieren²³⁴. Für die vorliegende Problemstellung ist besonders die hierarchische Verbindung mit der Optimierung als dominanter Verfahren geeignet. Dabei steuert die Optimierung die Suche nach Alternativen und stößt die Simulation zur Bewertung der Alternativen unter Unsicherheit an²³⁵. Abbildung 3.11 stellt den beschriebenen Ablauf im Vergleich zur allgemeinen Vorgehensweise einer Problemlösung grafisch dar:

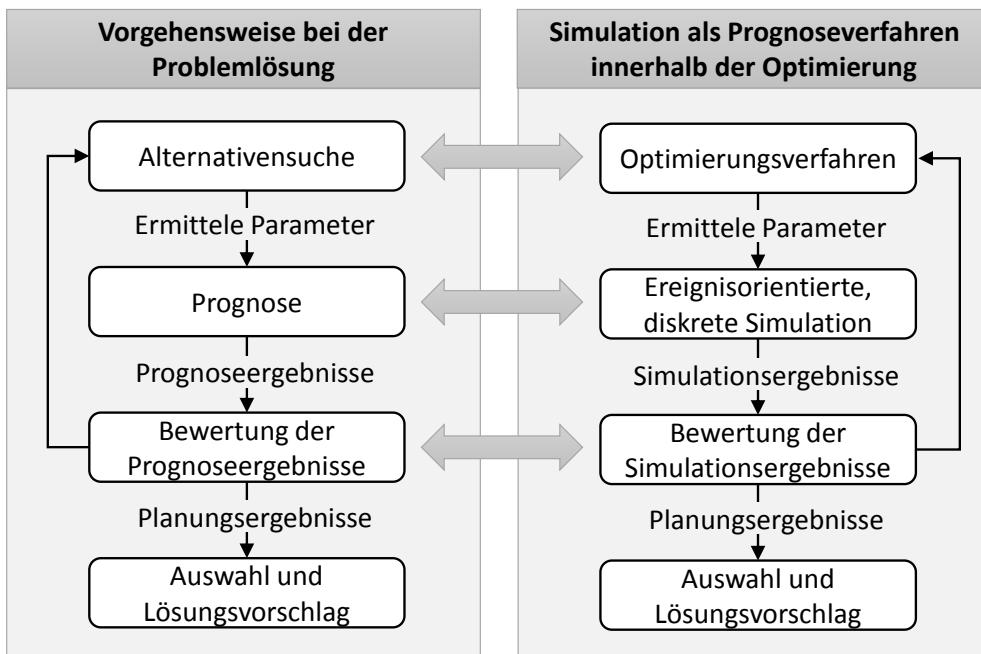


Abbildung 3.11: *Simulation als Bewertungsfunktion*²³⁶

Grundsätzlich eignen sich fast alle Optimierungsverfahren für den simulationsbasierten Einsatz. Jedoch reduziert sich die Auswahl der geeigneten Verfahren, wenn ein diskreter Lösungsraum mit einer großen Anzahl an Lösungen betrachtet wird²³⁷. In diesem Fall verbleiben neben ineffizienten Zufallsverfahren insbesondere Metaheuristiken als effizient einsetzbare Verfahren²³⁸. Dazu zählen die vorgestellten evolutionären Algorithmen, die nicht nur eine globale Suche unterstützen, sondern aufgrund ihres Ablaufs auch gut mit leichten Streuungen der Simulationsergebnisse umgehen können²³⁹.

²³⁴ Siehe [MK11], S. 41 f.

²³⁵ Siehe ebd., S. 43. Eine alternative Definition findet sich in [BM06], S. 535. Dort wird simulationsbasierte Optimierung als mehrfacher Analyseprozess eines Simulationsmodells unter Variation der Paramtereinstellungen durch Optimierung beschrieben.

²³⁶ Aus [MK11], S. 43 mit Bezug auf [März02].

²³⁷ Vgl. [KR11], S. 21–28 und [HN09], S. 75 f.

²³⁸ Siehe [ZPR11], S. 594 f. und [BM06], S. 536.

²³⁹ Ólafsson weist darauf hin, dass der Selektionsprozess, der von den Ergebnissen der Simulation abhängig ist, durch geringe Abweichungen der Erwartungswerte sogar effizienter arbeiten kann. [Ólaf06], S. 644.

Innerhalb der Simulation erfolgt eine mehrwertige Betrachtung der Unsicherheit durch die Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Verwendet das Optimierungsverfahren dann die Erwartungswerte, erfolgt an der Schnittstelle zwar nur noch eine einwertige Betrachtung, innerhalb der Simulation entsteht jedoch kein Informationsverlust.

Die simulationsbasierte Optimierung in Form der Kombination von Metaheuristiken und diskreter, ereignisorientierter Simulation ermöglicht es, auch größere Modelle und Modelle mit nicht-linearen Bestandteilen zu lösen. Aus diesem Grund ist sie für die vorliegende Problemstellung anderen Verfahren, wie beispielsweise der stochastischen Optimierung, vorzuziehen²⁴⁰.

²⁴⁰ Vgl. [ZPR11], S. 593 und [Scho01], S. 120 f.

4 Zu leistende Arbeit

Um die Liefertreue von Aufträgen mit Komplettlieferungs- oder Kitting-Logistikanforderungen zu steigern, bietet sich das hybride prädiktiv-reaktive Rescheduling als geeignetes Rahmenkonzept an. In dieses Konzept lassen sich Redundanzmaßnahmen integrieren, die die Liefertreue der Aufträge gegen negative Auswirkungen von durch Unsicherheit ausgelösten Störungen absichern.

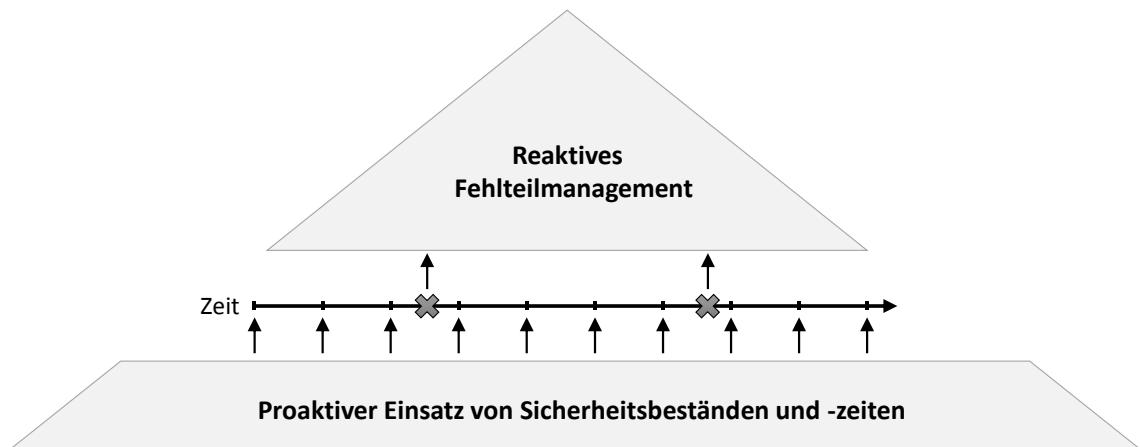


Abbildung 4.1: Bausteine der hybriden Absicherung

Dafür sind die zwei in Abbildung 4.1 dargestellten Komponenten notwendig. Die Hauptaufgabe ist die Generierung eines geeigneten Präventivpotenzials vor dem Eintritt von möglichen Störungen. Dazu eignet sich ein proaktiv und periodisch durchgeführtes Rescheduling-Verfahren, das aus den normalen MRP-Plänen robuste Pläne erzeugt, indem Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten eingeplant werden.

Keines der bisher existierenden Verfahren zur Planung von Sicherheitszeiten und Sicherheitsbeständen leistet eine kombinierte, simultane Planung beider Absicherungsmöglichkeiten unter der gegebenen Zielsetzung. Die grundlegende Aufgabe ist dementsprechend die Integration von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten in einem gemeinsamen Planungsverfahren. Das verwendete Modell muss aufgrund der Multi-Projektumgebung so angepasst werden, dass die individuellen Liefertreuwerte der betrachteten Aufträge in die Zielfunktion einfließen und die Kapitalbindung als Restriktion erfasst wird. Zusätzlich muss eine dynamische Anpassung der Sicherheitsbestände an die jeweiligen Projekte sichergestellt werden.

Aufgrund der erfolgreichen Anwendung in ähnlichen Szenarien kann für die gemeinsame Planung auf die simulationsbasierte Optimierung als Lösungsmethodik zurückgegriffen werden. Für die Mehrziel-Optimierung sind dabei die evolutionären Algorithmen besonders geeignet. Für deren Einsatz müssen problemspezifische Repräsentationen, geeignete

Operatoren und weitere Parameter entsprechend definiert werden. Das zugehörige Simulationsmodell zur Evaluierung der erwarteten Liefertreue muss die MRP-Logik korrekt abbilden und die im Problem vorwiegend auftretenden zeitlichen Unsicherheiten, in Form von Schwankungen der Liefer- und Durchlaufzeiten, adäquat berücksichtigen.

Durch die Begrenzung des Kapitaleinsatzes und der Mehrziel-Betrachtung terminiert das Verfahren an dieser Stelle noch nicht. Da mit begrenzten Mitteln nicht alles erreicht werden kann, muss als Anschlussentscheidung festgelegt werden, welche Aufträge abgesichert und somit wahrscheinlich pünktlich beliefert werden und welche bewusst nicht abgesichert beziehungsweise zu spät beliefert werden. Diese Entscheidung entspricht der Auswahl einer individuellen Lösung aus der Pareto-Menge. Das Goal Programming ist eine geeignete Ausgangsbasis für die Entwicklung einer automatischen Auswahllogik, die dabei die intra- und inter-projektbezogenen Interdependenzen berücksichtigt. Des Weiteren muss für eine mögliche manuelle Überprüfung das vorgestellte visuelle Auswahlinterface an die Auswertung von Liefertreuezielen sowie Sicherheitsbeständen und -zeiten angepasst werden.

Aufbauend auf dieser Grundlage agiert dann eventbasiert ein reaktives Rescheduling-Verfahren zur Minimierung der Auswirkungen einer tatsächlich eingetretenen Störung. Das Verfahren entspricht einem reaktiven Fehlteilmanagement, indem zuerst die Auswirkungen der Störung ermittelt werden und anschließend die möglichen Handlungsoptionen zur Minimierung dieser berechnet werden. Dazu wird eine Reparatur des ursprünglichen Plans durchgeführt, wobei das zuvor geschaffene Präventivpotenzial ausgenutzt wird. Um die Einbettung in das prädiktiv-reaktive Rescheduling Framework zu komplettieren, sind einige exemplarische Verfahren beziehungsweise Ablaufregeln zu definieren, anhand derer mögliche Nutzungen des Präventivpotenzials für das Fehlteilmanagement aufgezeigt werden.

5 Konzeption

5.1 Proaktives Verfahren

Für den proaktiven Aufbau des Präventivpotenzials mit dem Ziel der Maximierung der individuellen Auftragsliefertreuewerte erfolgt die Einplanung von dynamischen Sicherheitsbeständen und -zeiten aufgrund der möglichen Einsparpotenziale simultan. Obwohl aufgrund der vorwiegenden zeitlichen Abweichungen Sicherheitszeiten besonders geeignet scheinen, werden parallel auch Sicherheitsbestände betrachtet. Dies basiert auf der Annahme, dass Sicherheitsbestände für Gleichteile in überschneidenden Aufträgen eine kostengünstigere Steigerung der Liefertreue-Werte als entsprechende Sicherheitszeiten ermöglichen.

Durch die langfristig angestrebte Maximierung der Kapitalrendite sowie die Auflösung des Zielkonfliktes zwischen Lieferservice und Kosten in Form eines Budgets zur Verbesserung der Liefertreue ergibt sich eine obere Kapitalbindungsgrenze für das Problem. Dieser Wert sollte zu keinem Zeitpunkt durch die Investitionen in Sicherheitsbestände und -zeiten überschritten werden. Aufgrund der identifizierten, für die Problemstellung geeigneten Lösungsmethoden in den vorherigen Kapiteln, ergibt sich der in Abbildung 5.1 dargestellte Ablauf für das proaktive Verfahren:

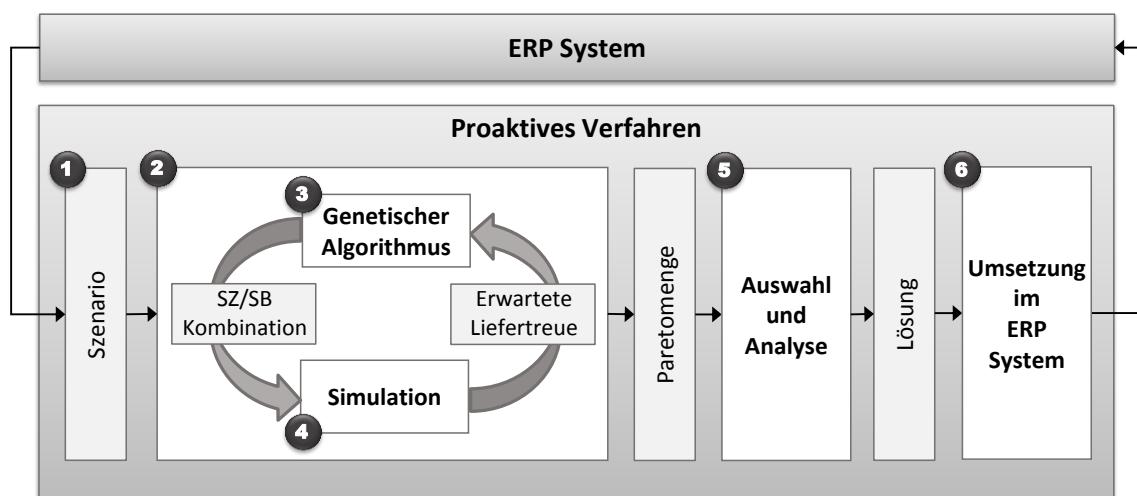


Abbildung 5.1: Ablauf des proaktiven Verfahrens

1. Szenario:

Ausgangsbasis ist ein vorgenerierter Plan auf Basis des MRP-Verfahrens. Dieser berücksichtigt initial keine Unsicherheit und wird nachträglich entsprechend der gewünschten Robustheit modifiziert. Dies ist möglich, da das betrachtete Liefernetzwerk ohne Kapazitätseinschränkungen arbeitet²⁴¹. Die im Szenario enthaltenen Daten werden in Kapitel 5.1.1 beschrieben.

2. Simulationsbasierte Optimierung:

Aufgrund der Eignung für die Mehrzieloptimierung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten und den real zu erwartenden komplexen Problemstellungen, wird als Lösungsverfahren die simulationsbasierte Optimierung mittels genetischer Algorithmen eingesetzt. In Kapitel 5.1.2 erfolgt die mathematische Formulierung der Zielsetzung und der Nebenbedingungen.

3. Genetischer Algorithmus:

Der genetische Algorithmus definiert den Verlauf der dynamischen Sicherheitsbestände und die individuellen Sicherheitszeiten je Planauftrag. Dabei werden bei der Lösungsgenerierung und Evaluierung die Material-, Kapital- und Betriebsmittelrestriktionen berücksichtigt. Die für den genetischen Algorithmus notwendigen Komponenten werden in Kapitel 5.1.3 definiert.

4. Simulation:

Die Simulation dient der Bewertung der erwarteten Liefertreue je Auftrag. Dabei wird wiederholt eine stochastische, eventbasierte, diskrete Simulation des modifizierten MRP-Plans durchgeführt. Diese gibt die Erwartungswerte der erreichten Liefertreue zurück. Die Simulationsumgebung wird in Kapitel 5.1.4 erläutert.

5. Auswahl und Analyse:

Rückgabewert der simulationsbasierten Optimierung ist eine Pareto-Menge aus der anschließend die finale Lösungsauswahl erfolgt. Für den fortlaufenden Einsatz ist dieser Prozess standardmäßig automatisiert (Kapitel 5.1.5), jedoch existiert zusätzlich die Möglichkeit, manuell zu priorisieren und Lösungen im Detail zu untersuchen (Kapitel 5.1.6).

²⁴¹ Wäre dies nicht der Fall, könnten nachträgliche Modifikationen eventuell vorhandene Kapazitätsgrenzen verletzen.

6. Umsetzung im ERP-System:

Im letzten Schritt muss die ausgewählte Lösung, also die daraus resultierenden zusätzlichen Planaufträge für Sicherheitsbestand und die Sicherheitszeiten, zurück in das ERP-System übertragen werden. Dies kann automatisiert oder manuell erfolgen²⁴².

Die Planung der Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten erfolgt in Anlehnung an den MRP-Ablauf ebenfalls rollierend. Auf die Besonderheiten bei der rollierenden Integration wird in Kapitel 5.1.7 eingegangen.

5.1.1 Definition der Szenario-Daten

Um die Adaption an beliebige ERP-Systeme zu ermöglichen, wird eine Abstraktionschicht in Form eines Szenarios definiert. Alle nachfolgenden Verfahren agieren nur noch auf den so bereitgestellten Daten, was die Integration des Verfahrens vereinfacht.

5.1.1.1 Grundstruktur

Das in Abbildung 5.2 dargestellte Szenario enthält die für die Planungsverfahren notwendigen Daten. Die Grundlage bilden dabei die Stammdaten, die Informationen zu Lagerorten, Werken, Lieferanten, Materialien und Kunden enthalten. Diese werden durch Bewegungsdaten ergänzt. Dazu gehören die Kundenaufträge mit Informationen zu den enthaltenen Positionen und den zugehörigen Projekten. Da die Liefertreue für normale Aufträge zufriedenstellend ist und durch die Einplanung von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten in anderen Aufträgen nicht negativ beeinträchtigt wird, werden im Szenario nur Aufträge mit Logistikanforderungen hinsichtlich Komplettlieferungen und Kits betrachtet. Dabei wird zur Vereinfachung der Berechnungen angenommen, dass alle Positionen dieser Aufträge mit dem gleichen Lieferdatum und Auslieferlager versehen sind²⁴³.

²⁴² Da die jeweiligen ERP-Systeme und Integrationsschritte ebenfalls unternehmensspezifisch sind, wird die konkrete Umsetzung im Weiteren nicht beschrieben.

²⁴³ Enthält ein Auftrag Positionen mit verschiedenen Lieferzeitpunkten oder Auslieferlagerorten, können diese nur in mehreren Lieferungen bedient werden. Aus diesem Grund sind die individuellen Lieferungen jeweils als eigenständige Komplettlieferung beziehungsweise Kit mit einem eigenen Liefertreueziel zu betrachten. Zur Vereinfachung werden entsprechende Aufträge im Szenario in mehrere Unteraufträge aufgeteilt, die jeweils nur eine Lieferung enthalten.

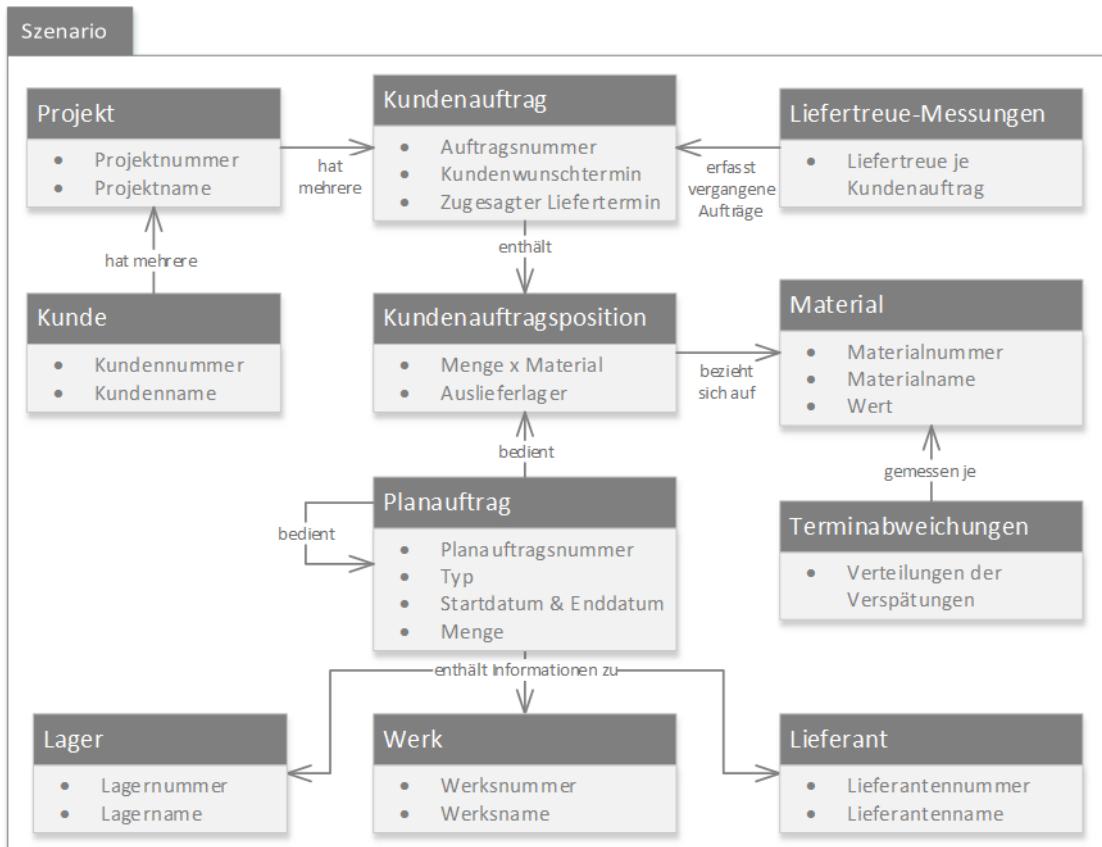


Abbildung 5.2: Definition der Szenario-Daten

Des Weiteren werden, zur Vermeidung von Abbildungsfehlern, die Ergebnisse des MRP-II-Laufs in Form von Planaufträgen, ergänzt um Vorgänger- und Nachfolgerinformationen, übertragen²⁴⁴. Jede Kundenauftragsposition wird durch einen Planauftrag bedient, der zunächst nur ein internes planerisches Element darstellt, das jederzeit geändert oder gelöscht werden kann. Innerhalb eines frei wählbaren Horizonts wird dieser dann in ein bedarfsrelevantes Element umgesetzt²⁴⁵. Dabei entscheiden Auftragsart, Beschaffungs- und Sonderbeschaffungsart über die spezifische Umsetzung²⁴⁶:

- **Fertigungsaufträge:** Entstehen durch Planaufträge für Materialien mit der Beschaffungsart Eigenfertigung und werden in den Werken ausgeführt. Die weiteren enthaltenen Informationen umfassen neben Terminen das fertigende Werk sowie dem Lagerort, in den das produzierte Material geliefert wird.

²⁴⁴ Siehe [KS06], S. 110. Ein Planauftrag ist nach SAP-Definition „die Anforderung der Materialbedarfsplanung an ein Werk, die Beschaffung eines bestimmten Materials zu einem festgelegten Zeitpunkt zu veranlassen. Er gibt also an, wann und in welcher Höhe der Zugang eines Materials erfolgen soll“ [SAP13a-ol].

²⁴⁵ Vgl. [SAP13b-ol] und [SAP13c-ol].

²⁴⁶ Die nachfolgenden Beispiele stellen eine Auswahl der wichtigsten und nachfolgend betrachteten Elemente dar. Für eine vollständige Übersicht siehe [SAP13d-ol].

- **Bestellanforderungen:** Entstehen durch Planaufträge für Materialien mit der Beschaffungsart Fremdbeschaffung und werden durch Lieferanten erfüllt. Der spezifische Lieferant kann durch das praktizierte Single-Sourcing entsprechend frühzeitig identifiziert werden.
- **Umlagerungen:** Entstehen als spezielle Form der Bestellanforderung, wenn Waren innerhalb eines Unternehmens zwischen zwei Werken beschafft und geliefert werden²⁴⁷. Beispielsweise durch den Montagebedarf an Komponenten aus dem Werk für die Produktgruppe B1, die im Werk für die Produktgruppe B2 weiter verarbeitet werden.

Zusätzlich werden anhand der vergangenen Bewegungsdaten zwei weitere Elemente des Szenarios generiert. Die Messung der Liefertreue erfolgt für bereits gelieferte Kundenaufträge und enthält für diese die Information, ob sie pünktlich oder lieferuntreu waren. Die Terminabweichungen enthalten für jedes Material eine oder mehrere empirische Verteilungen, die anhand der vergangenen Abweichungen zwischen geplanten und realisierten Terminen erstellt wurden.

5.1.1.2 Generierung der Verteilungen

Um die zeitlichen Schwankungen möglichst exakt berücksichtigen zu können, werden die Terminabweichungen durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen ausgedrückt, die anhand realer vergangener Beobachtungen erzeugt werden. Da die Durchlaufzeiten in der Produktion und die Wiederbeschaffungszeiten bei den Lieferanten schwanken, werden Fertigungsaufträge und Bestellungen gemessen. Für eine Materialbestellung wird erfasst, welchen Termin der Lieferant zugesagt hat und zu welchem Termin er tatsächlich geliefert hat. Die Differenz der Termine ergibt die Abweichung. Um eine Verfälschung durch fehlende Komponenten bei Produktionsaufträgen zu vermeiden, muss bei diesen, ausgehend vom tatsächlichen Startdatum, das geplante Enddatum berechnet werden. Die Abweichung ergibt sich dann aus der Differenz zwischen dem geplanten und dem realisierten Fertigstellungstermin.

Tabelle 5.1: Erfassung der Terminabweichungen

Material	Geplantes Enddatum	Reales Enddatum	Abweichung
4711	15.12.2013	15.12.2013	0
4711	17.12.2013	19.12.2013	2
4712	19.12.2013	19.12.2013	0
[...]			

²⁴⁷ Siehe [SAP13e-o]. Dies ist in den zuvor beschriebenen großen Liefernetzwerken oft der Fall.

Anhand der Erfassung, die beispielsweise wie in Tabelle 5.1 durchgeführt wird, lassen sich mittels der deskriptiven Statistik entsprechende empirische Verteilungen erzeugen²⁴⁸. Dazu werden alle Ausprägungen des Merkmals „Abweichung“ gelistet und ihre absoluten Häufigkeiten gezählt, woraus sich entsprechend relative und kumulierte Häufigkeitswerte errechnen lassen.

Tabelle 5.2: Häufigkeitswerte der Abweichungsausprägungen

Ausprägung	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit	Kumulierte Häufigkeit
x	$h(x)$	$f(x)$	$H(x)$
0	10	0,5	0,5
1	8	0,4	0,9
2	0	0,0	0,9
3	2	0,1	1,0

Dabei wurden im Beispiel aus Tabelle 5.2²⁴⁹ Verspätungen von 0, 1 und 3 Tagen beobachtet. Die für das Szenario verwendete Funktion $H(x)$ beantwortet die Fragestellung, welcher Anteil der Daten kleiner oder gleich x ist. In Abbildung 5.3 werden die relative und kumulierte Häufigkeit grafisch gegenübergestellt.

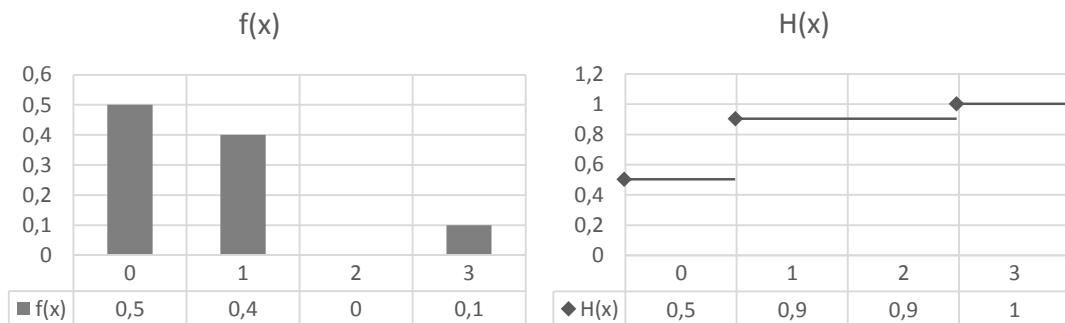


Abbildung 5.3: Grafische Darstellung der relativen und kumulierten Häufigkeit

Für qualitativ aussagekräftige empirische Verteilungen müssen ausreichend Messwerte erfasst werden. Dazu sollte eine Anzahl an minimal benötigten Messwerten definiert werden²⁵⁰. Überschreitet ein Material diese, so wird eine empirische Verteilung anhand der Werte erzeugt. Ist dies nicht der Fall, kann keine verlässliche Aussage hinsichtlich der möglichen Abweichungen getroffen werden. Dies kann durch eine Verteilung mit $H(0) = 1$ ausgedrückt werden, was aufgrund der Toleranz der Kunden hinsichtlich der

²⁴⁸ Vgl. dazu [RU11], S. 19–32 und [Kohn05], S. 45–47. Aufgrund der großen Menge an zu erzeugenden Verteilungen wird an dieser Stelle von einer Überführung in theoretische Verteilung durch Parametrisierung abgesehen.

²⁴⁹ Für Belieferungen und Produktionsaufträge, die früher als geplant fertiggestellt werden, wird in diesem Fall eine Abweichung von 0 angenommen, da für die Liefertreue nur Verspätungen relevant sind.

²⁵⁰ Diese ist wieder individuell vom jeweiligen Unternehmen zu bestimmen.

Liefertreue während eines Projektanlaufs möglich ist²⁵¹. Sind ausreichend Daten vorhanden, so können die Verteilungen nicht nur je Material, sondern auch je Kombination aus Material und Lieferant oder Material und Werk erstellt werden.

Um aktuelle Entwicklungen, wie zum Beispiel Verbesserungen im Produktionsablauf, schneller in die Verteilungen einfließen zu lassen, können neuere Werte mit höherer Gewichtung einfließen. Zusätzlich können zu alte Einträge ignoriert werden, indem nur Terminabweichungen innerhalb eines gleitenden Betrachtungsfensters berücksichtigt werden.

5.1.2 Modell der simulationsbasierten Optimierung

In diesem Kapitel erfolgt die mathematische Repräsentation der simulationsbasierten Optimierung. Dazu werden zunächst die Mengen, Variablen und Parameter definiert.

5.1.2.1 Mengen

M	Menge der Materialien (Laufindex m)
L	Menge der Lagerorte (Laufindex l)
A	Menge der Kundenaufträge (Laufindex a)
P	Menge der Planaufträge (Laufindex p)
$B_{mlt} \subseteq P$	Menge der Planaufträge mit Material m , Ziellager l und $g_p^{ende} = t$
$V_p \subset P$	Menge der Vorgänger von Planauftrag p (rekursiv)
$N_p \subset P$	Menge der Nachfolger von Planauftrag p
T	Anzahl Planungsperioden (Laufindex t)

²⁵¹ Alternativ kann auch eine Standardverspätung von mehreren Tagen für Produkte ohne Verteilung angenommen werden.

5.1.2.2 Entscheidungs- und Hilfsvariablen

5.1.2.2.1 Entscheidungsvariablen

sb_{mlt} Höhe des Sicherheitsbestands für Material m in Lager l in Periode t

sz_p Sicherheitszeit in Perioden für Planauftrag p

5.1.2.2.2 Hilfsvariablen

y_{pt}^1 1 wenn p in Periode t Bestand durch Sicherheitszeit generiert, sonst 0

y_{pt}^2 1 wenn p für Sicherheitsbestandsabbau in Periode t nutzbar ist, sonst 0

y_p^3 1 wenn p nicht ausgeführt wird, sondern Sicherheitsbestand reduziert wird, sonst 0

d_p^{ende} Dynamischer Endtermin von p unter Berücksichtigung der Sicherheitszeiten der Nachfolger-Planaufträge

5.1.2.3 Parameter

k_m Wert von Material m

og^{kap} Kapitalbindungs-Obergrenze

og_p^{sz} Obergrenze für SZ bei Planauftrag p

og_{mlt}^{sb} Obergrenze für SB-Erhöhung von Material t in Lager l in Periode t

v^{sb} Maximaler Vorschauhorizont für Sicherheitsbestandsaufbau

t^{fz} Periode, in der die Frozen Zone endet

e_p Durch Planauftrag p erzeugte Menge eines Materials im Ziellager

g_p^{ende} MPR-Ergebnis für den geplanten Endtermin von Planauftrag p

s_l^{sz} Sicherheitszeit-Steuerung auf Lagerebene. 1, wenn Sicherheitszeiten für Planaufträge in Lager l erlaubt, sonst 0

s_m^{sz} Sicherheitszeit-Steuerung auf Materialebene. 1, wenn Sicherheitszeiten für Material m erlaubt, sonst 0

s_l^{sb} Sicherheitsbestands-Steuerung auf Lagerebene. 1, wenn Sicherheitsbestand in Lager l erlaubt, sonst 0

s_m^{sb} Sicherheitsbestands-Steuerung auf Materialebene. 1, wenn Sicherheitsbestand für Material m erlaubt, sonst 0

<i>bigM</i>	Hinreichend große Zahl
$\overline{\varphi_{\text{in}}}$	Verteilungen der Durchlaufzeiten und Wiederbeschaffungszeiten je Material
$\overline{\sigma_{\text{en}}}$	Gegebene Rahmenbedingungen, die die oben definierten Mengen und Entscheidungen aus vorhergehenden Planungsläufen enthalten

5.1.2.4 Optimierungsmodell

Anhand der definierten Mengen, Variablen und Parameter lässt sich die Zielsetzung wie folgt formulieren:

$$\begin{aligned} Z = \max \bar{LT}(\bar{sb}, \bar{sz}) &= \bar{E} \left(LTSim(\bar{sb}, \bar{sz}, \overline{\varphi_{\text{in}}}, \overline{\sigma_{\text{en}}}) \right) \\ &= (E(LT_1), \dots, E(LT_a)) \end{aligned} \quad a = 1, \dots, A \quad (5.1)$$

Die Mehrzieloptimierung erfolgt hinsichtlich der Maximierung der Liefertreue jedes Auftrags im Planungshorizont. Diese ist abhängig von den festgelegten Sicherheitsbeständen und -zeiten. Die Größe der Sicherheitszeiten in Perioden wird durch die Entscheidungsvariable sz_p je Planauftrag gesteuert. Aufgrund der Projektabhängigkeit erfolgt die Festlegung der Höhe der Sicherheitsbestände durch sb_{mlt} dynamisch für jede Material-Lagerort-Kombination in jeder Periode, was eine konstante Anpassung erlaubt.

Aufgrund der zu berücksichtigenden Unsicherheit wird dazu der Erwartungswert der Liefertreue $E(LT_a)$ durch mehrfaches Auswerten der Simulation $LTSim$ berechnet, was die mehrwertige Berücksichtigung der Unsicherheit ermöglicht. An dieser Stelle werden die Ziele individuell je Auftrag betrachtet, da durch Vorabgenerierung der Pareto-Menge eine größere Vielfalt an Lösungen erhalten werden kann. Dadurch ist später jederzeit eine schnelle Anpassung der Präferenzen bei der a posteriori erfolgenden finalen Lösungsauswahl möglich.

Die interprojektbezogenen Interdependenzen werden in Form der Kapitalbindungsnebenbedingung durch die Restriktionen (5.2) bis (5.4) berücksichtigt²⁵².

$$\sum_p^P y_{pt}^1 \times e_p \times k_m + \sum_m^M \sum_l^L k_m \times sb_{mlt} \leq og^{\text{kap}} \quad \forall t \in T \quad (5.2)$$

$$y_{pt}^1 = \begin{cases} 1, & sz_p > 0 \text{ \& } d_p^{\text{ende}} - sz_p \leq t < d_p^{\text{ende}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.3)$$

²⁵² Intraprojektbezogene Interdependenzen werden während der finalen Lösungsauswahl aus der Pareto-Menge berücksichtigt.

$$d_p^{\text{ende}} = g_p^{\text{ende}} - \sum_n^{N_p} sz_n \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.4)$$

Die erste Restriktion der Gruppe sichert die Kapitalbindung unter Betrachtung des Worst Case, damit die Kapitalbindungsobergrenze in keinem Fall überschritten wird. Der Wert der durch die Sicherheitszeiten temporär gelagerten Materialien wird dabei unter der Annahme berechnet, dass trotz Unsicherheit alle Wiederbeschaffungszeiten und Durchlaufzeiten die geplanten, pünktlichen Werte annehmen, wodurch alle Sicherheitszeiten maximal bestandswirksam sind. Zusätzlich werden die jeweiligen Werte der Sicherheitsbestände addiert. Diese Summe darf die vorgegebene Kapitalbindungsobergrenze nicht überschreiten. Durch Restriktion (5.4) werden mögliche mehrfache Verschiebungen durch Sicherheitszeiten berücksichtigt. Aufgrund der langfristigen Projekte, die eine regelmäßige Auftragsverteilung bedingen, ist die Verwendung einer gemeinsamen Obergrenze für alle Perioden möglich²⁵³.

Die Kapitalbindungsrestriktionen erzwingen gleichzeitig die Dynamik der Sicherheitsbestände. Weil das zur Verfügung stehende Kapital begrenzt ist und eine Mangelsituation vorliegt, führt dies in Kombination mit der Liefertreue-Zielfunktion dazu, dass auslaufende Materialien automatisch als Sicherheitsbestand abgebaut werden oder erst gar nicht aufgebaut werden. Dies liegt darin begründet, dass der entsprechende Materialbestand zu keiner Verbesserung der Liefertreue irgendeines Auftrags beiträgt und die zugehörige Lösung durch Lösungen mit besser eingesetztem Kapital hinsichtlich der Liefertreuewerte pareto-dominiert wird²⁵⁴.

Der Einsatz von Sicherheitsbeständen bedingt Logikrestriktionen, die analog zu den allgemein bekannten Lagerbilanzgleichungen agieren:

$$sb_{mlt} \geq sb_{ml(t-1)} - \sum_p^P y_{pt}^2 \times y_p^3 \times e_p \quad \forall m \in M, l \in L, t \in T \quad (5.5)$$

$$y_{pt}^2 = \begin{cases} 1, & d_p^{\text{ende}} = t \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.6)$$

$$1 + \sum_v^{V_p} y_v^3 + sz_v \leq y_p^3 + (1 - y_p^3) \times bigM \quad \forall p \in P \quad (5.7)$$

²⁵³ Liegt eine ungleichmäßige Verteilung der Aufträge mit starken Schwerpunkten bezüglich der Einlastung der Aufträge vor, so können alternativ periodenabhängige Obergrenzen verwendet werden.

²⁵⁴ Dabei muss jedoch der betrachtete Planungszeitraum ausreichend lang gewählt werden, worauf in Kapitel 5.1.7 eingegangen wird.

Die dynamische Anpassung der Sicherheitsbestände erfordert zusätzliche Restriktionen, die die logische Validität erhalten. Restriktion (5.5) stellt dabei sicher, dass eine Reduzierung des Sicherheitsbestands nur dann möglich ist, wenn ein Planauftrag, anstatt ausgeführt zu werden, aus dem zuvor aufgebauten Sicherheitsbestand erfüllt wird. Dabei wird durch Restriktion (5.6) der Einfluss der Sicherheitszeiten berücksichtigt. Wird ein Planauftrag zum Abbau des Sicherheitsbestands eingesetzt, so werden weder er noch seine Vorgänger ausgeführt. Deswegen wird durch Restriktion (5.7) sichergestellt, dass keiner der Vorgänger mehr Sicherheitsbestand abbauen kann oder eine Sicherheitszeit zugeteilt bekommt.

Die Validität der Sicherheitszeiten wird durch folgende Restriktion geprüft:

$$t^{\text{fz}} \leq d_p^{\text{ende}} - (g_p^{\text{ende}} - g_p^{\text{start}}) - sz_p \quad \forall p \in P \quad (5.8)$$

Um die Nebenbedingung der eingeschränkten Betriebsmittel zu erfüllen, werden die Restriktionen (5.9) und (5.10) ergänzt, die Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten in nicht zugelassenen Lagerorten unterbinden. Die Restriktionen (5.11) und (5.12) dienen zur Feinsteuerung auf Materialebene.

$$\sum_t^T \sum_m^M sb_{mlt} \leq s_l^{\text{sb}} \times \text{big}M \quad \forall l \in L \quad (5.9)$$

$$\sum_t^T \sum_m^M \sum_p^{B_{mlt}} sz_p \leq s_l^{\text{sz}} \times \text{big}M \quad \forall l \in L \quad (5.10)$$

$$\sum_t^T \sum_l^L sb_{mlt} \leq s_m^{\text{sb}} \times \text{big}M \quad \forall m \in M \quad (5.11)$$

$$\sum_t^T \sum_l^L \sum_p^{B_{mlt}} sz_p \leq s_m^{\text{sz}} \times \text{big}M \quad \forall m \in M \quad (5.12)$$

Durch die nachfolgenden Restriktionen werden Ganzahligkeit, Nichtnegativität und Obergrenzen für Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten definiert.

$$0 \leq sb_{mlt} \leq \max\{sb_{ml(t-1)}, og_{mlt}^{\text{sb}}\} \quad \forall m \in M, l \in L, t \in T \quad (5.13)$$

$$og_{mlt}^{\text{sb}} = \sum_{i=t}^{t+v^{\text{sb}}} \sum_p^{B_{mli}} e_p \quad \forall m \in M, l \in L, t \in T \quad (5.14)$$

$$0 \leq sz_p \leq og_p^{\text{sz}} \quad \forall p \in P \quad (5.15)$$

$$sb_{mlt}, sz_p \in \mathbb{N}; \quad (5.16)$$

$$y_{pt}^1, y_{pt}^2, y_p^3 \in \{0,1\} \quad (5.17)$$

Die Restriktionen (5.13) und (5.14) schränken die Sicherheitsbestände hinsichtlich einer maximal erlaubten Aufbaumenge zu jedem Zeitpunkt ein. Dazu wird die Annahme getroffen, dass Sicherheitsbestände keine weiteren Verbesserungen bezüglich der Liefertreue erzielen, sobald ihre Höhe die Menge der in einem zukünftigen Zeitraum eintreffenden Bedarfe überschreitet. Diese ist für die langfristig bekannten Bedarfe der Komplettlieferungen und Kits gültig und erlaubt so eine entsprechende Einschränkung des Lösungsraums²⁵⁵. In (5.15) wird eine maximale Länge für entsprechende Sicherheitszeiten festgelegt.

Aufgrund der rollierenden Planung sind teilweise Werte für sb_{mlt} und sz_p , die innerhalb der Frozen Zone liegen, schon zuvor fixiert worden. Jedoch können unter Umständen auch Werte außerhalb der Frozen Zone fixiert sein, was in Kapitel 5.1.7 erläutert wird.

5.1.3 Genetischer Algorithmus zur Optimierung von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten

In diesem Kapitel werden die notwendigen Komponenten für die Verwendung des genetischen Algorithmus mit dem in Kapitel 2 beschriebenen Problem konzipiert. Diese sind dabei bewusst unabhängig von konkreten genetischen Verfahren definiert, sodass die spezifische Implementierung später frei gewählt und so fortlaufend an den aktuellen Stand der Technik angepasst werden kann.

5.1.3.1 Repräsentation

Für die Entscheidungsvariablen sb_{mlt} und sz_p muss eine geeignete Repräsentation zur Integration in ein Chromosom gewählt werden. Die spätere Performanz des Verfahrens ist maßgeblich von der Repräsentation abhängig. Je exakter der Lösungsraum durch diese eingeschränkt wird, umso schneller wird die Pareto-Front approximiert.

Die Sicherheitszeitbestimmung pro Planauftrag kann direkt als Gen übernommen werden, da diese nur den zulässigen Lösungsraum abdeckt. Ein Wert von null entspricht keiner

²⁵⁵ Dabei muss jedoch der Parameter v^{sb} ausreichend groß gewählt werden, um auch Verschiebungen durch Sicherheitszeiten abzudecken.

Sicherheitszeit, ein Wert größer null repräsentiert die Länge der Sicherheitszeit in Perioden für den entsprechenden Planauftrag. Die hier verwendete relative Darstellung ist, aufgrund der Betrachtung der Unsicherheit auf mehreren Ebenen, der in Hnainen et al. verwendeten absoluten Darstellung vorzuziehen. Im Gegensatz zur absoluten Darstellung, bei der Änderungen auf einer Ebene weitere Gene auf anderen Ebenen beeinträchtigen können, ermöglicht die relative Darstellung eine individuelle Betrachtung der Gene während der Selektion und Reproduktion. Dadurch entfallen zusätzliche Prüfungen beziehungsweise Reparaturmaßnahmen zur Erhaltung der Validität.

Die Übernahme der Variable sb_{mlt} erzeugt jedoch bei der Betrachtung vieler Perioden ein extrem langes Chromosom, dessen Validität konstant erhalten werden muss. Eine Änderung in der Höhe des Sicherheitsbestandes bedingt dann immer eine Änderung aller zugehörigen und zeitlich nachfolgenden Gene. Um diesen Mehrfachaufwand zu vermeiden, erfolgt eine Konzentration auf die möglichen Änderungszeitpunkte. Durch die Restriktion (5.14) wird die Höhe des Sicherheitsbestandes durch die Bedarfe innerhalb eines Vorschauhorizonts eingeschränkt. Basierend auf der getroffenen Annahme, dass ein Sicherheitsbestand, der diese Grenze überschreitet, keine weiteren Vorteile hinsichtlich der Liefertreue bringt, lässt sich für das vorliegende Problem schließen, dass nur ein Sicherheitsbestand in der Mindesthöhe der kleinsten Auftragsmenge eine Verbesserung der Liefertreue erreicht. Als Folge daraus müssen zu den möglichen Änderungszeitpunkten neben den Abbaumöglichkeiten nur die Erhöhungsschritte, die der Potenzmenge der Auftragsmengen innerhalb des Vorschauhorizonts entsprechen, betrachtet werden. Dies wird durch die Einführung der Variable sb_p realisiert, die sich immer auf einen konkreten Planauftrag p bezieht. Dabei bedeutet $sb_p = -1$, dass der Planauftrag nicht ausgeführt, sondern stattdessen Sicherheitsbestand abgebaut wird (entspricht $y_p^3 = 1$). Ein Wert von 0 beeinflusst den Sicherheitsbestand nicht. Alle Werte mit $sb_p > 0$ bedeuten eine Erhöhung des Sicherheitsbestands von Material m im Ziellager l des Auftrags p um die Menge e_p zum Zeitpunkt $t = d_p^{ende} - sb_p$. Durch diese Umformulierung wird eine für die genetische Repräsentation geeigneter relative Darstellung der zuvor absoluten Repräsentation durch sb_{mlt} erreicht²⁵⁶.

$$sb_p = \begin{cases} > 0, & \text{Erhöhung des Sicherheitsbestands} \\ 0, & \text{Neutral} \\ -1, & \text{Reduktion des Sicherheitsbestands} \end{cases} \quad (5.18)$$

²⁵⁶ Dabei ist anzumerken, dass diese Umformulierung nur in Systemen ohne Losgrößenbündelung der Planaufträge ohne Einbußen möglich ist. Aufgrund der Charakteristika des in der Problemstellung beschriebenen Systems kann davon ausgegangen werden, dass größtenteils keine Bündelung erfolgt. Wird trotzdem eine Bündelung durchgeführt, so resultiert dies nur in einem geringen Genauigkeitsverlust der möglichen Auf- und Abbaustufen.

$$sz_p = \begin{cases} > 0, & \text{Sicherheitszeit in Perioden} \\ 0, & \text{Neutral} \end{cases} \quad (5.19)$$

Die Ober- und Untergrenzen der Gene sind anhand des Modells wie folgt definiert:

$$sb_p \in [-1, \min(v^{\text{sb}}, g_p^{\text{ende}} - t^{\text{fz}}))] \quad (5.20)$$

$$sz_p \in [0, og_p^{\text{sz}}] \quad (5.21)$$

Weil die Evaluation von Nebenbedingungen vor der Umwandlung des Genotyps in den zugehörigen Phänotyp effizienter ist, werden zur Abbildung der Betriebsmittel-Restriktionen (5.9) bis (5.12) die Gene der Planaufträge, die nicht erlaubte Lagerorte und Materialien enthalten, direkt entfernt. Zur weiteren Beschleunigung durch die Verkleinerung des Lösungsraums geschieht dies ebenfalls bei Planaufträgen für Materialien, die immer pünktlich sind, deren Terminabweichung also $H(0) = 1$ entspricht.

Neben der Auswahl der Gen-Kodierung stellt die Reihenfolge der Gene im Chromosom den zweiten wichtigen Bestandteil der Repräsentation dar. Diese entscheidet in Kombination mit den genetischen Operatoren über die Güte der Nachfolgerpopulationen.

Die Goldbergsche Building-Blocks-Hypothese²⁵⁷ über den Erfolgsgrund der genetischen Algorithmen basiert darauf, dass bestimmte Gruppen von Genen – die sogenannten Building Blocks – bei der Verwendung in beliebigen Chromosomen mit hoher Wahrscheinlichkeit eine positive Auswirkung auf deren Fitnessbewertung ausüben. Um entsprechende Building Blocks erfolgreich zu generieren, müssen die Abhängigkeiten zwischen diesen minimiert werden. Deswegen sind bei der Reihenfolgebestimmung insbesondere die einzuhaltenden Nebenbedingungen und Abhängigkeiten untereinander zu berücksichtigen. Mit dem Ziel, dass bei späteren Crossover-Schritten möglichst viele Nebenbedingungen erfüllt bleiben und valide Lösungen entstehen, wurde die in Abbildung 5.4 gezeigte Reihenfolge gewählt.

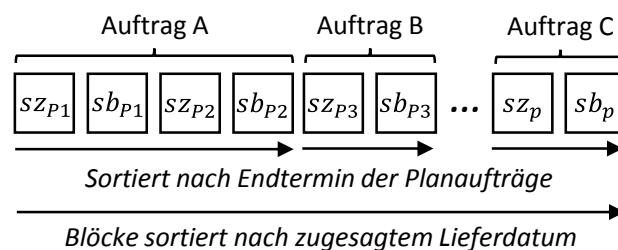


Abbildung 5.4: Kodierung des Chromosoms

²⁵⁷ [Gold89], S. 41–45, [Holl00] und vgl. auch [CLV07], S. 506 f.

Das Chromosom hat dabei die Länge von $2 \times |p|$. Die Planaufträge werden in Blöcke nach zugehörigem Kundenauftrag eingeteilt und blockintern nach den Endterminen der Planaufträge sortiert. Die Blöcke an sich werden nach dem zugesagten Lieferdatum sortiert.

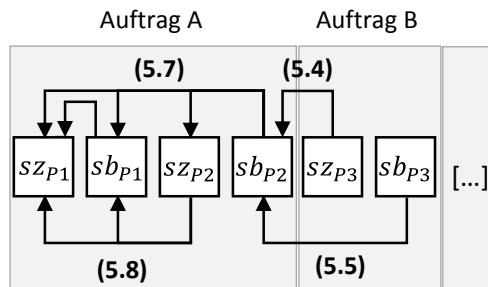


Abbildung 5.5: Restriktionsbedingte Interdependenzen zwischen Genen

Für die gewählte Repräsentation wirken sich die Interdependenzen durch die Nebenbedingungen wie in Abbildung 5.5 dargestellt aus. Dabei wirken sich der Sicherheitsbestandsabbau (5.7) und die Sicherheitszeit-Verschiebung (5.8) auftragsintern auf mehrere Planaufträge aus. Durch die Bilanzüberprüfungen mit den Restriktionen (5.4) und (5.5) existieren aber auch Auswirkungen zwischen verschiedenen Aufträgen. Da sich der Sicherheitsbestandsabbau und die Verschiebungen durch Sicherheitszeiten innerhalb eines Auftrags auf sehr viele Gene auswirken, sind diese Gene in der gewählten Kodierung als Building Block zusammengefasst. Insgesamt muss noch die übergreifende Bilanz der Sicherheitsbestände gewährleistet werden, dies betrifft jedoch je nach Anzahl der projektspezifischen Materialien eine geringere Menge an Genen, weswegen diese Kodierung beispielsweise einer Kodierung nach Materialreihenfolge vorzuziehen ist.

5.1.3.2 Initialisierung

Die einfachste Form der Generierung der Ausgangspopulation besteht aus einer zufälligen Initialisierung jedes Gens zwischen den entsprechenden Ober- und Untergrenzen. Durch die Begrenzung der Kapitalbindung und die weiteren Restriktionen entstehen so jedoch viele ungültige Initiallösungen. Eine hohe Güte der Ausgangspopulation hinsichtlich Gültigkeit und Diversifikation verbessert aber die Qualität der Approximation der Pareto-Front²⁵⁸.

²⁵⁸ Vgl. [Talb09], S. 193–198.

Deswegen wird als Alternative ein Initialisierungsverfahren eingesetzt, das so lange für jede Lösung x_i in der Ausgangspopulation G_0 die Werte von sb_p und sz_p mit Zufallszahlen initialisiert, bis x_i hinsichtlich der Nebenbedingungen gültig ist. Die Anzahl der initialisierten Gene kann zusätzlich beschränkt werden um die Verletzungen der Kapitalbindungsrestriktion zu verringern. Zur Beschleunigung der Initialisierung können neben der reinen Überprüfung der Nebenbedingungen auch die in 5.1.3.3.2 beschriebenen Reparaturverfahren eingesetzt werden. Der Einsatz der beschränkten Zufallsinitialisierung bietet dadurch einen guten Kompromiss zwischen Lösungsgüte und Initialisierungsgeschwindigkeit²⁵⁹.

5.1.3.3 Ziele & Fitnessbewertung

Für die Ursprungspopulation und jede generierte Nachfolgerpopulation muss die Fitness der Individuen bewertet werden. Übertragen auf die Problemstellung ergibt sich somit für jeden Kundenauftrag ein Ziel. Dieses Ziel entspricht der erwarteten Liefertreue, mit dem Minimalwert 0% und Maximalwert 100%.

5.1.3.3.1 Berücksichtigung von Restriktionsverletzungen

Durch die Reproduktionsphase werden Änderungen an den Individuen vorgenommen, die dazu führen können, dass ungültige Lösungen hinsichtlich der Restriktionen entstehen. Dabei ist zwischen harten und weichen Restriktionsverletzungen zu unterscheiden. Harte Restriktionsverletzungen entstehen bei Lösungen, die gegen Logikrestriktionen verstößen, also real nicht umsetzbar wären. Dies umfasst die Restriktionen (5.5) bis (5.8). So ist es nicht möglich, dass zwei Aufträge, die hierarchisch voneinander abhängig sind, gleichzeitig dem Abbau von Sicherheitsbestand dienen²⁶⁰. Die Kapitalbindungsrestriktion hingegen ist eine weiche Restriktion, da die Lösung bei Verletzung zwar nicht gültig, aber immerhin strukturell valide ist.

Es existieren verschiedene Strategien im Umgang mit Restriktionsverletzungen²⁶¹, wobei die einfachste die direkte Zurückweisung ist, bei der die Lösung nicht weiter betrachtet

²⁵⁹ Alternativ ist der Einsatz von Heuristiken möglich, die Schritt für Schritt gültige Lösungen konstruieren. Dabei sind jedoch Annahmen hinsichtlich der Verteilung der Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten notwendig, was zu einer ungewollten Beeinflussung der Suche im Lösungsraum führt. Dies wird durch die Zufallsinitialisierung vermieden.

²⁶⁰ Wenn der übergeordnete Auftrag dem Sicherheitsbestandsabbau dient, dann wird dieser nicht ausgeführt. Dadurch existiert der untergeordnete Auftrag in dieser Lösung nicht mehr, kann also niemals den Sicherheitsbestand reduzieren.

²⁶¹ Siehe ebd., S. 49–54.

wird. Enthält der Lösungsraum jedoch viele unzulässige Lösungen, kann dadurch die Effizienz des genetischen Algorithmus verringert werden.

Um das zu verhindern, werden Sanktionierungsstrategien und Reparaturstrategien eingesetzt. Bei Sanktionierungsstrategien werden Lösungen trotz Verletzung von Nebenbedingungen weiterhin im Suchprozess berücksichtigt. Dazu gehen die Verletzungen in Form von Strafkosten oder einer Strafbewertung in die Zielfunktion ein oder werden als zusätzliche Information erfasst und entsprechend ausgewertet. Reparaturstrategien wandeln ungültige in gültige Lösungen um, indem problemspezifische Heuristiken zur gezielten Manipulation der Gene eingesetzt werden. Da aufgrund der vielen Restriktionen die Anzahl der invaliden Lösungen im betrachteten Problemumfeld sehr groß ist, wird für die Fitnessbewertung das in Abbildung 5.6 dargestellte Verfahren eingesetzt.

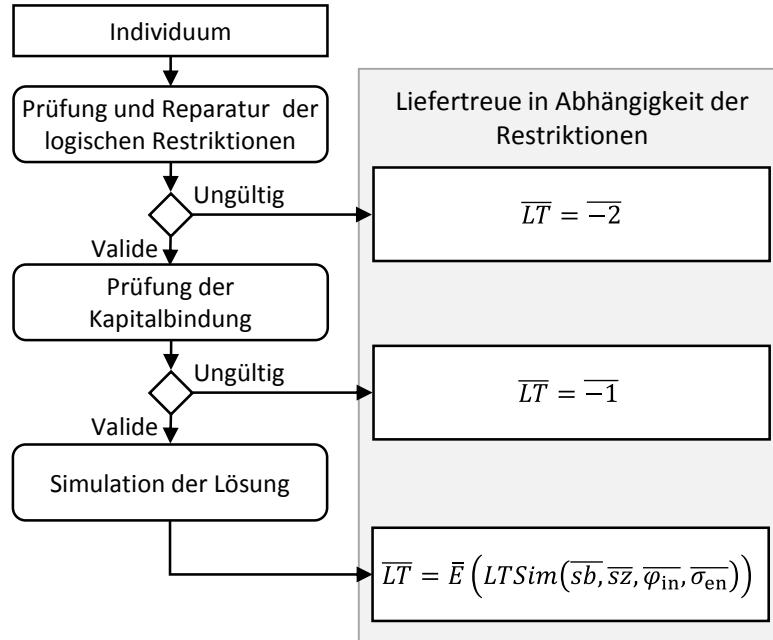


Abbildung 5.6: Berücksichtigung der Restriktionen vor der Fitnessbewertung

Zuerst erfolgt die Prüfung der logischen Restriktionen. Da eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit für eine Verletzung dieser Restriktionen in der Reproduktionsphase besteht, werden entsprechende Reparaturverfahren angewandt. Ist eine Reparatur nicht möglich, so wird der erwartete Liefertreuewert für jeden Auftrag auf einen Wert unter dem simulativ erreichbaren Minimalwert festgelegt. Anschließend erfolgt die Prüfung der Kapitalbindungsrestriktion, wobei aufgrund der Komplexität auf ein Reparaturverfahren verzichtet wird. Dies liegt in der Problematik begründet, dass eine Reparatur der Kapitalbindungsrestriktion leicht Verletzungen der anderen Nebenbedingungen nach sich zieht, die dann ebenfalls wieder repariert werden müssen. Eine erfolgreiche Terminierung des Verfahrens ist somit nicht sichergestellt. Deswegen wird der Vektor der erwarteten Liefertreue ebenfalls auf einen Wert unter dem Minimalwert initialisiert, jedoch so, dass Lösungen

mit einer Verletzung der logischen Restriktionen dominiert werden. Ist die Lösung hinsichtlich aller Restriktionen gültig, wird die Simulation zur Bewertung der erwarteten Liefertreue angestoßen.

Das beschriebene Vorgehen bringt neben der Effizienzsteigerung durch die Reparaturmaßnahmen noch weitere Vorteile mit sich. Zum einen wird der unnötige Einsatz der Simulationsbewertung vermieden, da diese sehr viel Zeit im Verhältnis zu allen anderen Schritten benötigt. Zum anderen werden aus einer Menge von invaliden Lösungen die strukturell validen Lösungen bevorzugt, wodurch eine schnellere Konvergenz des Verfahrens hin zu realisierbaren Lösungen durch den frühzeitigen Ausschluss von logisch nicht umsetzbaren Lösungen erreicht wird.

5.1.3.3.2 Reparatur der Nebenbedingungen

Die für die Reduktion der im Reproduktionsprozess entstandenen ungültigen Lösungen notwendigen Reparaturverfahren müssen hinsichtlich ihrer Verfahrensweise und Reihenfolge so definiert werden, dass bei der Reparatur einer Nebenbedingung möglichst keine weiteren Nebenbedingungen verletzt werden.

Nachfolgend werden Reparaturverfahren für die Logikrestriktionen vorgestellt, die jede Restriktion individuell reparieren, wobei auf den Erhalt der zuvor reparierten Restriktionen Wert gelegt wird. Deswegen müssen die Verfahren in der beschriebenen Reihenfolge durchgeführt werden.

Abbau von Sicherheitsbeständen innerhalb eines Auftrags

Für jeden Planauftrag existiert eine Kette an Planaufträgen, die alle Vorgänger- und Nachfolger-Planaufträge umfasst. Restriktion (5.7) stellt sicher, dass innerhalb dieser Kette nur ein Planauftrag Sicherheitsbestand abbauen kann. Werden bei der Restriktionsprüfung zwei oder mehr Planaufträge innerhalb einer Kette identifiziert, die Sicherheitsbestand abbauen, muss eine Reparatur erfolgen. Das Zurücksetzen des Sicherheitsbestandsabbaus resultiert dabei in der Reaktivierung von mindestens einem weiteren Gen. Weil dieses die Restriktionen der Frozen Zone und der Bilanz beeinflusst, wird das Sicherheitsbestandsabbau-Reparaturverfahren zuerst ausgeführt. Nachfolgend wird ein einfaches Verfahren beschrieben, dass eine möglichst schnelle Reparatur ermöglicht:

```

01 Planauftrag p1,p2 = Verletzende Planaufträge mit p1 ∈ Vp2
02 Planauftrag[] pKette = Vp2 ∩ Np2
03 Planauftrag[] betroffenePA = Planaufträge ∈ pKette mit sbp = -1
04
05 abbauAuftrag = zufälliges p ∈ betroffenePA
06 sbabbauAuftrag = -1
07 ∀a ∈ betroffenePA \ sbabbauAuftrag: sba = 0

```

Quelltext 5.1: Reparaturverfahren Sicherheitsbestandsabbau

Dazu werden aus der Kette der verletzenden Planaufträge alle weiteren Planaufträge, die den Sicherheitsbestandsabbau ebenfalls verletzen, berücksichtigt, sodass eine gemeinsame Reparatur erfolgt. Es muss eine Entscheidung getroffen werden, welcher Planauftrag für den Abbau verbleibt und welche Werte für die anderen Planaufträge gesetzt werden. Um eine unvoreingenommene und schnelle Erforschung des Lösungsraums zu gewährleisten, erfolgt diese Auswahl zufällig. Aufgrund der vorliegenden Mangelsituation führt ein weiterer Aufbau mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zur Verletzung der Kapitalbindungsrestriktion. Deswegen werden für alle anderen Aufträge neutrale Werte gesetzt (siehe Zeile 7).

Existieren zwei Planaufträge, von denen einer Sicherheitsbestand abbaut und der andere ein Vorgänger von diesem mit einer positiven Sicherheitszeit ist, so kann nur eine Sicherheitsmaßnahme wirksam werden. Der Einsatz eines Reparaturverfahrens würde wiederum zu mehrfach verketteten Änderungen im Genom führen. Deswegen wird festgelegt, dass Aufträge mit Sicherheitsbestandsabbau Priorität haben. Entsprechende Vorgängeraufträge mit Sicherheitszeiten werden nicht mehr berücksichtigt.

Verletzung der Frozen Zone

Sicherheitsbestandsentscheidungen können durch die Beschränkung der Obergrenze in (5.18) die Frozen Zone nicht verletzen. Bei Sicherheitszeiten ist dies jedoch möglich, da sich diese bei Planaufträgen, die in Vorgänger- bzw. Nachfolgerbeziehung zueinander stehen, aufaddieren. Ein dazu passendes Reparaturverfahren wird in Quelltext 5.2 gelistet.

```

01 Planauftrag p1 = Verletzender Planauftrag
02 Planauftrag[] reduzierbarePA = Np1 mit szp > 0
03 int verletzung = Max Unterschreitung von tfz in reduzierbarePA
04
05 while(verletzung > 0) {
06     Planauftrag p = Zufälliger Planauftrag ∈ reduzierbarePA
07     int reduktion = Zufallszahl([1,max(szp, verletzung)])
08     szp= szp- reduktion
09     verletzung = verletzung - reduktion;
10 }
```

Quelltext 5.2: Reparaturverfahren Sicherheitszeiten

Wird eine Verletzung der Restriktion festgestellt, besteht nur die Möglichkeit, die Sicherheitszeit des verletzenden Planauftrags oder die der nachfolgenden Planaufträge zu verringern. Dazu wird so lange einer dieser Planaufträge ausgewählt und dessen Sicherheitszeit reduziert, bis die Frozen Zone nicht mehr verletzt wird.

Bilanz der Sicherheitsbestände

Die vorhergehenden Verfahren haben sichergestellt, dass in einer Auftragskette nur ein Planauftrag Sicherheitsbestand abbaut und keine ungültigen Sicherheitszeiten existieren.

Aufgrund der Verschiebungen eines möglichen Sicherheitsbestandsabbaus durch die Sicherheitszeiten muss die Reparatur einer verletzten Bilanz danach erfolgen.

Die Verletzung der Bilanz für ein Material in einem Lagerort entspricht einer Lösung, in der ein Planauftrag dem Abbau von Sicherheitsbestand dient, dabei aber die Auftragsmenge e^p zu diesem Zeitpunkt größer ist als der vorhandene Sicherheitsbestand sb_{mlt} . Zur Reparatur existieren nur zwei Möglichkeiten. Entweder kann vor dem verletzenden Zeitpunkt mehr Sicherheitsbestand aufgebaut werden oder der Abbau durch den betroffenen Planauftrag unterlassen werden. Quelltext 5.3 zeigt das Reparaturverfahren:

```

01 Planauftrag p = Verletzender Planauftrag
02 if(Zufallszahl([0,1]) > 0.5) {
03     sbp = 0
04 } else {
05     Planauftrag[] potentielleAufbauPA = Planaufträge x mit
06                               gxende - vsb ≥ gpende und sbx ≤ 0
07     while(Bilanz weiterhin verletzt) {
08         Planauftrag x = Zufälliger Planauftrag ∈ potentielleAufbauPA
09         sbx = Zufallszahl([max(1, gxende - gpende), ogxsb])
10     }
11 }
```

Quelltext 5.3: Reparaturverfahren Sicherheitsbestands-Bilanz

Dabei wird zufällig eine der beiden Möglichkeiten ausgewählt. Im ersten Fall müssen die Planaufträge identifiziert werden, die vorher ausreichend Sicherheitsbestand aufbauen können. Dafür kommen alle Planaufträge aus dem gleichen Lager mit gleichem Material infrage, deren Endzeitpunkt vor dem Endzeitpunkt des verletzenden Auftrags p liegt und zusätzlich auch solche, deren Endzeitpunkt zwar zeitlich nach p liegt, aber mit kleinerem Abstand als der Parameter der Sicherheitsbestands-Vorlaufzeitverschiebung v^{sb} . In der Schleife von Zeile 7-9 wird dann so lange Aufträgen aus dieser Menge ein positiver Wert für das Sicherheitsbestandsgen zugeordnet, bis die Bilanz nicht mehr verletzt ist. Dabei ist zu beachten, dass auch bei Aufträgen mit späterem Endtermin der Aufbau vor dem Endtermin von p stattfindet. Dies wird in Zeile 9 sichergestellt. Wird bei einem Gen der Sicherheitsbestandsabbau deaktiviert, so muss erneut eine Prüfung der Frozen Zone Restriktion erfolgen. Um potentielle Endlosschleifen zu vermeiden, wird das Frozen-Zone-Reparaturverfahren nicht eingesetzt. Stattdessen werden bei einer Verletzung der Restriktion die Liefertreuewerte der Lösung entsprechend Abbildung 5.6 ohne Simulation für jeden Auftrag auf -2 gesetzt.

5.1.3.4 Selektionsstrategie

Durch die Selektionsstrategie wird festgelegt, welche Individuen aus der Ausgangspopulation zur Reproduktion verwendet werden. Implementierungen der Strategien setzen auf den Vergleich von zwei oder mehr Individuen zur Auswahl. Um die Gültigkeit und Qualität der Lösungen zu verbessern, baut die implementierende Selektionsmethode dabei nicht nur auf reinen Dominanzkriterien auf. Durch die steigende Zielanzahl bei der individuellen Liefertreuebetrachtung der einzelnen Aufträge ergeben sich immer mehr pareto-äquivalente Lösungen. Deswegen werden zusätzlich die Nebenbedingungsverletzungen mit in den Prozess einbezogen um Lösungen mit geringerer Verletzung von Nebenbedingungen zu bevorzugen. Dies wird durch die Festlegung der Zielwerte wie in Abbildung 5.6 beschrieben erreicht, da automatisch gültige Lösungen gegenüber ungültigen bevorzugt werden. Für die Implementierung kann dadurch jeder für die Chromosomenstruktur geeignete Selektionsoperator genutzt werden.

Auf den ersten Blick erscheint es sinnvoll zusätzlich feinere Unterscheidungen bei der Selektion hinsichtlich der Kapitalbindungsverletzungen vorzunehmen, um die Konvergenz des Verfahrens bei initial mehreren ungültigen Lösungen in Richtung des gültigen Lösungsraums zu Beschleunigen. Jedoch ist die Definition eines geeigneten Auswahlkriteriums schwierig. So sind beispielsweise die Anzahl der Überschreitungen der Kapitalbindung in Perioden, die durchschnittliche Überschreitung je Periode oder der Gesamtwert der Überschreitungen keine zuverlässigen Indikatoren, da diese nicht nur von mehreren Genwerten, sondern auch von einem einzigen Genwert stark beeinflusst werden können. Des Weiteren sind zum Teil auch Modifikationen an den konkreten genetischen Implementierungen erforderlich, was die fortlaufende Anpassung an den aktuellen Stand der Technik erschwert²⁶². Aus diesen Gründen wird bei der vorliegenden Konzeption auf diese weitergehende Unterscheidung verzichtet und stattdessen die Initialisierung mit direkt gültigen Lösungen in Kombination mit einer auf die Konvergenz der Kapitalbindung angepassten Mutation bevorzugt.

²⁶² Beispielsweise müssten beim verwendeten NSGA-II auch die Auswahlalgorithmen des verwendeten Elite-Archivs angepasst werden.

5.1.3.5 Reproduktionsstrategie

Die Reproduktion besteht aus zwei Schritten. Zuerst erfolgt ein Crossover, der Teile von zwei Individuen zu einem oder mehreren Nachfolgern rekombiniert. Danach startet die Mutation, die einzelne Gene einer Lösung variiert. Aufgrund der enthaltenen Restriktionen, beeinflussen die zuvor beschriebenen Interdependenzen zwischen den Genen die Lösungsqualität. Ziel der Reproduktionsstrategie ist die Identifikation und Erhaltung von guten Building Blocks, durch die Berücksichtigung der Interdependenzen.

5.1.3.5.1 Crossover-Strategie

Die Implementierung eines Crossover-Operators sollte die vorhandenen Repräsentations-eigenschaften ausnutzen. Eine klassische, oft verwendete Crossover-Strategie basiert auf der zufälligen Auswahl des oder der Crossover-Stellen. Da durch die Kodierung potentielle Building Blocks jedoch auftragsweise zusammengefasst sind, ist die Beschränkung der zufällig ausgewählten Crossover-Punkte auf die Auftragsschnittstellen sinnvoll. Dadurch wird die Validität der rekombinierten Lösungen erhöht und potentielle Building Blocks bleiben erhalten.

5.1.3.5.2 Mutations-Strategie

Bei der klassischen Mutation werden ein oder mehrere Gene eines Individuums zufällig ausgewählt und ihr Wert ebenfalls zufällig verändert. Aufgrund der fehlenden Reparaturmaßnahmen für die Kapitalbindungsrestriktion wird die zufällige Wertänderung dieser Strategie zur Erhaltung der Validität der Lösungen und schnelleren Konvergenz hin zu gültigen Lösungen leicht abgewandelt.

Der Aufbau von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten erfolgt dazu abhängig von der Anzahl der Verletzungen dieser Restriktion. Existieren über längere Zeit in jeder Generation überwiegend Individuen, die die Kapitalbindung überschreiten, so wird die Chance bezüglich des Aufbaus von Sicherheitsbeständen und -zeiten geringer als die der Neutralität oder des Abbaus und umgekehrt. Dadurch wird bei einer allgemeinen Unterschreitung der Kapitalbindungsgrenze eine stärkere Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Kapitals und bei einer häufigen Überschreitung eine schnellere Reduktion des eingesetzten Kapitals erreicht.

5.1.3.6 Haltekriterien

Die Generierung und Bewertung von Nachfolgerpopulationen wird durchgeführt, bis ein Haltekriterium erreicht wird. Mögliche Kriterien sind beispielsweise Laufzeit, Anzahl der Iterationen oder der Vergleich mit Qualitätskriterien aus vorherigen Evaluationsläufen. Da die Qualität der Lösungen mit der Laufzeit ansteigt, ist in diesem Fall ein Ausnutzen der vorhandenen Laufzeit sinnvoll. Deswegen wird im realen Einsatz ein Zeitlimit als Haltekriterium eingesetzt. Die Definition der zur Verfügung stehenden Laufzeit ist dabei abhängig von der Integration in die rollierende Planung des MRP-Laufs, die in Kapitel 5.1.7 vorgestellt wird.

5.1.4 Diskrete, eventbasierte Simulation auf MRP-Basis zur Evaluierung der Liefertreue

Zur Fitnessbewertung werden durch die Simulation die erwarteten Liefertreue-Werte je Auftrag ermittelt. Die Simulation setzt, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, auf einem bereits generierten MRP-Plan auf und modifiziert diesen. Vorteilhaft dabei ist, dass die MRP-Logik zur Plangenerierung nicht nachgebildet werden muss und dadurch zahlreiche Fehlerquellen ausgeschlossen werden. Zusätzlich ist eine implizite Generierung des Simulationsmodells aus dem MRP-Plan möglich, wodurch der Einsatz des Verfahrens ohne aufwendige Modellerstellungsphasen auskommt.

Nachfolgend wird eine auf das Wesentliche reduzierte diskrete, eventbasierte Simulationsumgebung für die MRP-Ablaufsimulation entwickelt. Im Gegensatz zu kommerziell erhältlicher Software ist durch den Einblick in die Ablaufsteuerung die Sicherstellung der Vermeidung der von Koh und Saad identifizierten Ablauffehler garantiert. Zusätzlich wird durch die Reduktion auf die benötigten Komponenten eine Beschleunigung der Simulation erreicht. Dazu trägt ebenfalls die, durch die freie Gestaltung der technischen Umsetzung ermöglichte, gemeinsame Verwendung von Datenelementen mit dem genetischen Algorithmus bei²⁶³.

²⁶³ Siehe Kapitel 6.3.3.

5.1.4.1 Ablauf

Der übergeordnete Ablauf wird wie in Abbildung 5.7 beschrieben durchgeführt.

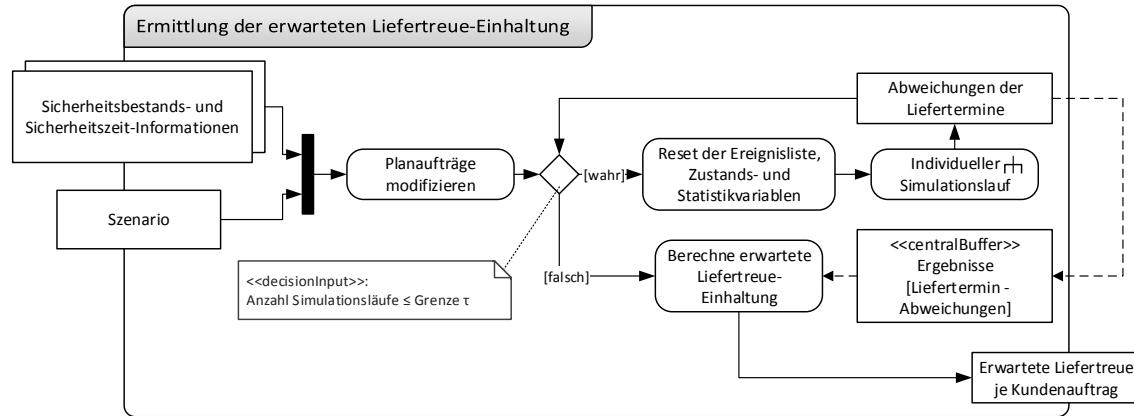


Abbildung 5.7: Übergeordneter Ablauf der Simulationsbewertung

Eingangsparameter sind die Daten des zuvor beschriebenen Szenarios und die durch den genetischen Algorithmus definierten Sicherheitsbestands- und Sicherheitszeit-Konfigurationen. Anhand dieser Parameter wird zunächst der ursprüngliche MRP-Plan modifiziert, indem die Start- und Endtermine der betroffenen Planaufträge entsprechend den Sicherheitszeiten angepasst werden. Zusätzlich werden Planaufträge, die dem Sicherheitsbestandsabbau dienen, gekennzeichnet und ihre Vorgänger entfernt, da diese keinen Einfluss mehr auf die Liefertreue ausüben.

Um die durch die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Terminabweichungen induzierte Stochastik adäquat zu berücksichtigen, werden anhand dieser Ausgangsdaten mehrere individuelle Simulationsläufe durchgeführt. Bei jedem Durchlauf wird die Abweichung zwischen den realisierten und den geplanten Lieferterminen gemessen. Die Anzahl der individuellen Simulationsläufe ist abhängig von der gewünschten Genauigkeit und wird durch den Parameter τ bestimmt²⁶⁴. Sind genügend Werte ermittelt worden, so wird aus diesen der erwartete Wert der Liefertreue berechnet²⁶⁵. Das Vorgehen während eines einzelnen Simulationslaufs entspricht dabei dem allgemeinen Ablaufschema einer ereignisorientierten Simulation, wie in Abbildung 5.8 ersichtlich ist²⁶⁶.

²⁶⁴ Vgl. 3.3.3.1. Die Streuung des Erwartungswerts wird durch ein großes τ reduziert, dabei die Laufzeit jedoch gesteigert. Entsprechend muss ein für den jeweiligen konkreten Anwendungsfall geeigneter Parameterwert gewählt werden.

²⁶⁵ An dieser Stelle können firmenspezifische Messmethoden eingesetzt werden.

²⁶⁶ Vgl. Abbildung 3.10.

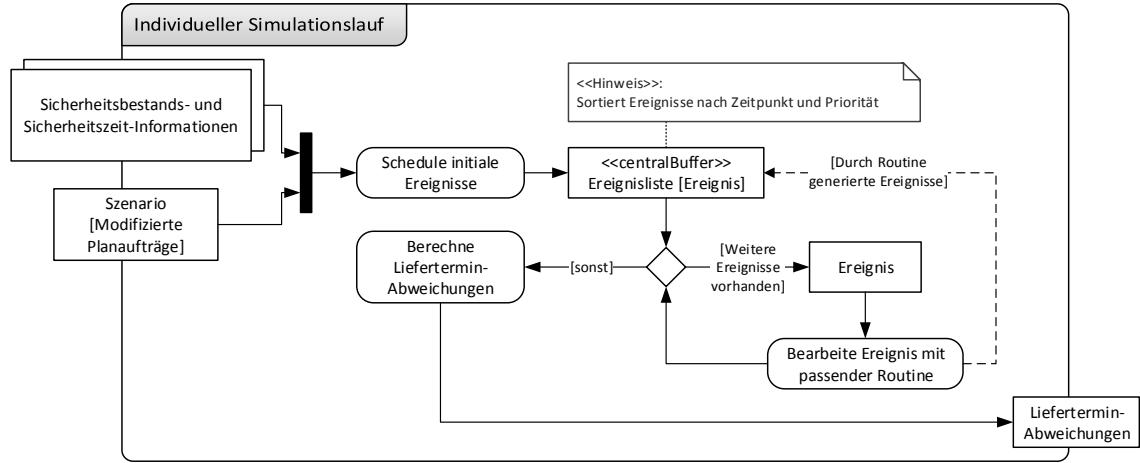


Abbildung 5.8: Schritte der Ablaufsimulation

Zuerst werden die aus dem MRP-Plan hervorgehenden initialen Ereignisse generiert und eingeplant (siehe Kapitel 5.1.4.4). Solange Ereignisse in der Ereignisliste vorhanden sind, werden diese nach ihrer Sortierungsreihenfolge von den zugeordneten Ereignisroutinen abgearbeitet. Dabei werden Zustands- und Statistikvariablen angepasst und Folgeereignisse generiert. Ist die Liste komplett abgearbeitet, terminiert der Simulationslauf und die Statistikvariablen werden bezüglich der Lieferterminabweichungen ausgewertet. In den folgenden Unterkapiteln werden die notwendigen Zustands- und Statistikvariablen sowie die zu betrachtenden Ereignisse und die zugehörigen Ereignisroutinen definiert.

5.1.4.2 Zustandsvariablen

Die Zustandsvariablen beschreiben das System zu einem bestimmten Zeitpunkt. Wird der Ablauf der Planaufträge simuliert, so ergeben sich zu den jeweiligen Start- und Endzeitpunkten Mengenänderungen von Materialien an bestimmten Lagerorten. Zusätzlich bewirkt ein Zugang von Sicherheitsbestand eine positive Mengenänderung und eine Anhebung der Sicherheitsbestandsgrenze im jeweiligen Lagerort, ein Abbau bewirkt entsprechend das Gegenteil. Um diese Änderungen des Systemstatus zu erfassen, sind folgende Variablen notwendig:

$$h_{ml} = \text{Höhe des disponiblen Lagerbestands von Material } m \text{ in Lager } l \quad (5.22)$$

$$h_{ml}^{\text{sb}} = \text{Höhe der Sicherheitsbestandsgrenze von Material } m \text{ in Lager } l \quad (5.23)$$

$$W_{ml} = \text{Warteschlange für ein Material } m \text{ in Lager } l \quad (5.24)$$

Neben den Informationen zu den Lagerbeständen aus Planaufträgen und Sicherheitsbeständen werden für jedes Lager FIFO-Warteschlangen²⁶⁷ geführt. Aufträge, die aufgrund von Verspätungen nicht bedient werden können, werden in diese Warteschlangen einge-reiht. Alle weiteren Aufträge, die auf ein Material in einem Lager mit belegten Warte-schlangen zugreifen, reihen sich ebenfalls ein. Da in der Praxis oft die Regel des Right Shifting²⁶⁸ bei Störungen angewandt wird, werden die Aufträge in der Warteschlange ent-sprechend ihrer Eingangsreihenfolge bedient, sobald ein Zugang für das betroffene Ma-terial erfolgt. Durch die Warteschlangen-Logik und die Reaktivierung, die nur bei einem Zugang der benötigten Materialien erfolgt, werden Auftragsverzögerungen effizient und mit den größtmöglichen diskreten Zeitschritten²⁶⁹ abgebildet und gleichzeitig die Auf-tragsfreigabe von Aufträgen mit Fehlteilen verhindert.

Da das Liefernetzwerk aufgrund des Lean-Supply-Chain-Managements ohne überflüs-sige Pufferbestände arbeitet, erfolgt die Initialisierung des disponiblen Lagerbestands für jedes Lager mit Nullwerten. Dies gilt ebenso für die Warteschlangen. Die Sicherheitsbe-stände werden anhand der bei vorherigen Planungsläufen fixierten Entscheidungen initia-lisiert.

5.1.4.3 Statistikvariablen

Die primär für die Auswertung relevanten Informationen sind die Abweichungen von geplanten zu realisierten Auslieferterminen der Kundenaufträge. Für jeden Kundenauf-trag existiert deswegen eine entsprechende Statistikvariable. Für erweiterte Auswertun-ten des Systemverhaltens kann die Erfassung dieser Differenz zusätzlich für jeden Planauftrag erfolgen.

5.1.4.4 Ereignisse und Ereignisroutinen

5.1.4.4.1 Berücksichtigte Ereignisse

Für die Konzeption der Simulation muss festgelegt werden, was als Ereignis betrachtet wird. Zur Bearbeitung eines Kundenauftrags sind die in Abbildung 5.9 dargestellten Ar-ten von Planaufträgen notwendig. Da für die Berechnung der Terminverschiebungen nur

²⁶⁷ First in, first out. Elemente werden in der Reihenfolge ihrer Aufnahme abgearbeitet.

²⁶⁸ Dabei werden bei Störungen alle Aktivitäten eines Plans so lange verzögert, bis die Störung behoben ist.

²⁶⁹ Ohne Warteschlangen müsste bei einer Verzögerung ansonsten eine Neueinplanung des verzögerten Auftrags um jeweils +1 Zeiteinheit erfolgen, zu deren Beginn jedes Mal erneut geprüft wird, welcher Auftrag bedient werden kann. Eine direkte Berechnung des neuen Starttermins ist aufgrund möglicher-weise anderer, bereits wartender Aufträge für das gleiche Material ohne Warteschlangen nicht möglich.

die Veränderungen am Lagerbestand relevant sind, ergeben sich zwei Ereignisse je Planauftrag-Typ. Diese werden jeweils zu Beginn und zum erfolgreichen Abschluss eines Plan- bzw. Kundenauftrags ausgelöst²⁷⁰.

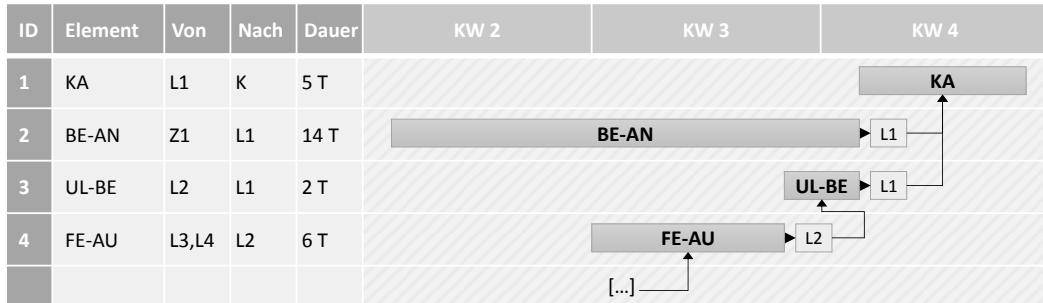


Abbildung 5.9: Planaufträge zu einem Kundenauftrag

Aus den verschiedenen Typen von Planaufträgen²⁷¹, dem Kundenauftrag und den Sicherheitsbestandsinformationen ergeben sich die in Tabelle 5.3 beschriebenen Ereignisse.

Tabelle 5.3: Ereignisse und auslösende Elemente

Auslöser		Ereignisse	Beschreibung
Bestellanforderung	⌚	EV_BEAN_A EV_BEAN_E	Bestellung durchführen Bestellte Ware trifft ein
	⌚	EV_ULBE_A EV_ULBE_E	Start des Umlagertransports Umgelagerte Ware trifft ein
Fertigungsauftrag	⌚	EV_FA_A EV_FA_E	Start des Fertigungsauftrags Produzierte Ware geht in Lager ein
	⌚	EV_KA_A EV_KA_E	Versuchter Start der Auslieferung Erfolgreiche Auslieferung
Sicherheitsbestandsaufbau	⌚	EV_SB_E	Erhöht Sicherheitsbestand in Ziellager
Sicherheitsbestandsabbau	-	-	Durch Modifikation der Planaufträge berücksichtigt
Sicherheitszeiten	-	-	Durch Modifikation der Planaufträge berücksichtigt

Für jede Bestellanforderung wird zunächst nur ein Anfangsereignis *EV_BEAN_A* zum Startzeitpunkt des Planauftrags generiert. Durch die Ereignisroutine bei der Abhandlung wird das Folgeereignis *EV_BEAN_E* erzeugt, was den Endzeitpunkt repräsentiert. Dabei werden neben der Auftragsdauer auch die Abweichungsverteilungen der Liefertermine

²⁷⁰ Aufgrund der Beschränkung auf Aufträge mit Komplettlieferungen und Kits ist nur der Zeitpunkt relevant, zu dem die vollständige Menge verfügbar ist, weswegen die Fertigung von Teilmengen zu früheren Zeitabschnitten nicht betrachtet werden muss. Zur Vereinfachung wird aus diesem Grund der Start von Planaufträgen ebenso nur ermöglicht, wenn die vollständige Menge der benötigten Materialien verfügbar ist.

²⁷¹ Vgl. dazu Kapitel 2.1.2.

entsprechend berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung aller Routinen findet sich in den nächsten Unterkapiteln. Analog werden Anfangs- und Endevents für die anderen Planauftrags-Typen erstellt. Jeder Kundenauftrag generiert ein Ereignis *EV_KA_A* zum zugesagten Liefertermin. Erst wenn die Auslieferung erfolgreich war, wird das zugehörige Endereignis erzeugt. Um den Abbildungsfehler der vorzeitigen Ausführung von Planaufträgen zu vermeiden, werden die Startereignisse jeweils zum ursprünglich geplanten Zeitpunkt eingeplant. Dadurch wird selbst bei einer früheren Bereitstellung von benötigten Materialien der nachfolgende Planauftrag nicht frühzeitig ausgeführt.

Zusätzlich müssen die Einflüsse der Sicherheitsbestände und der Sicherheitszeiten berücksichtigt werden. Sicherheitsbestandsinformationen haben zwei Auswirkungen. Der geplante Aufbau von Sicherheitsbestand erfolgt zu einem bestimmten Zeitpunkt. Dies wird jeweils durch ein Ereignis *EV_SB_E* zu diesem Zeitpunkt abgebildet. Der Abbau wird durch nicht ausgeführte Planaufträge realisiert und wird deswegen, ebenso wie die Sicherheitszeiten, bereits bei der Modifikation der Planaufträge berücksichtigt. Dadurch werden keine zusätzlichen Ereignisse benötigt. Die im Szenario verbleibenden Abbau-Aufträge erzeugen entsprechend keine eigenen Start- und Endereignisse.

Für die Abarbeitung der Ereignisse ist eine eindeutige Reihenfolge notwendig. Diese wird wie folgt festgelegt, wobei bei fehlender Eindeutigkeit auf die jeweils nächste Entscheidungsebene zurückgegriffen wird:

1. Zeitpunkt des Ereignisses
2. Events aus hierarchisch untergeordneten Planaufträgen zuerst
3. Zugänge (Endereignisse) vor Abgängen (Anfangsereignissen)
4. Alter des zugrunde liegenden Kundenauftrags
5. Erstellreihenfolge der Events

Neben dem Zeitpunkt als Hauptkriterium zur Sortierung wird zur Sicherstellung der Ablauflogik des MRP-Verfahrens auf Ebene 2 zurückgegriffen. Durch die dritte Ebene ist garantiert, dass das Verfahren auch bei einer Grobplanung auf Kalendertagebene funktioniert. Im Beispiel von Abbildung 5.9 wird so der Zugang des Fertigungsauftrags abgehandelt, bevor der Abgang durch den Umlagerauftrag stattfindet. Um die in der MRP-Planung oft angewandte FIFO-Reihenfolge hinsichtlich der Bedarfe zu berücksichtigen, wird in Ebene 4 sichergestellt, dass früher erstellte Aufträge Priorität vor später erstellten Aufträgen besitzen. Kann auch dadurch keine Entscheidung hinsichtlich der Reihenfolge getroffen werden, wird auf die Erstellreihenfolge der Events als eindeutiges Kriterium zurückgegriffen.

5.1.4.4.2 Ereignisroutinen zu Bestellanforderungen

Zum Startzeitpunkt einer Bestellanforderung wird das Event *EV_BEAN_A* eingeplant. Um die zeitlichen Schwankungen der Lieferanten-Liefertermine abzubilden, greift die dazugehörige Ereignisroutine (siehe Abbildung 5.10) auf die Verteilung der entsprechenden Terminabweichung zu und errechnet den neuen Endtermin anhand der vorher geplanten Dauer und dem aus der Verteilung gezogenen Abweichungswert. Zu diesem Zeitpunkt wird dann das Endereignis *EV_BEAN_E* eingeplant.

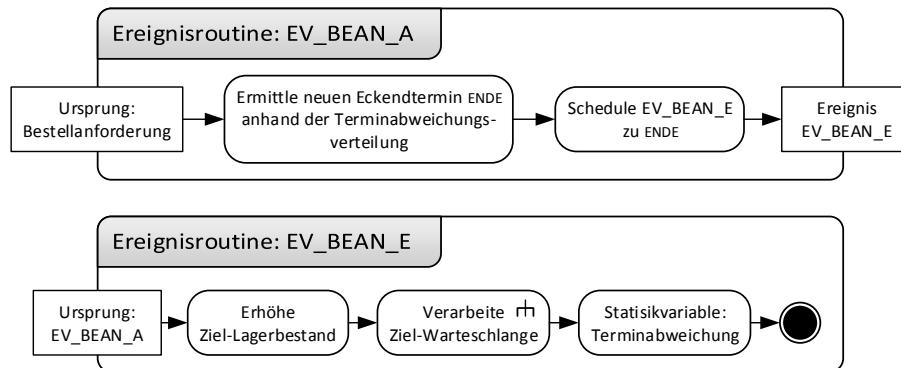


Abbildung 5.10: Ereignisroutinen für Bestellanforderungen

Endet eine Bestellanforderung, so resultiert dies in einer Erhöhung des Ziel-Lagerbestands um die Auftragsmenge des beschafften Materials. Zusätzlich werden bei einem Zugang mögliche Warteschlangen abgearbeitet und im Anschluss die Statistikvariablen aktualisiert²⁷².

5.1.4.4.3 Ereignisroutinen zu Umlagerbestellungen

Für Umlagerbestellungen wird ebenfalls zum Starttermin ein Event generiert. Wird dieses das erste Mal aufgerufen, so wird geprüft, ob die zu transportierende Menge im Ausgangslager des Transports vorhanden ist. Wenn ja, so wird der Endtermin anhand der ursprünglichen Planauftragsdauer festgelegt. Da nur zeitliche Schwankungen bei der Eigenfertigung und Zulieferung sich im Problem als störend auswirken, wird an dieser Stelle vorausgesetzt, dass Transporte keinen Verzögerungen unterliegen. Ist die Menge jedoch nicht ausreichend oder die Warteschlange für das Material im Startlager nicht leer, so reiht sich der Auftrag in die Warteschlange ein. Wird der Auftrag dann erneut eingeplant, erfolgt zunächst eine Prüfung, ob ausreichend Material vorhanden ist und das Ereignis die erste Position in der Warteschlange einnimmt. Wenn ja, wird die benötigte Menge entnommen und das Ereignis aus der Warteschlange entfernt. Das weitere Vorgehen entspricht dann einer erfolgreichen Entnahme im ersten Versuch. Wenn nicht, ver-

²⁷² Siehe 5.1.4.4.7 für die Warteschlangen-Hilfsroutine.

bleibt das Ereignis in der Warteschlange, bis es erneut aufgerufen wird. Diese Überprüfungen sind notwendig, um den Start von Umlagerbestellungen mit Fehlteilen zu vermeiden, wodurch auch diese Forderung von Koh und Saad sichergestellt ist.

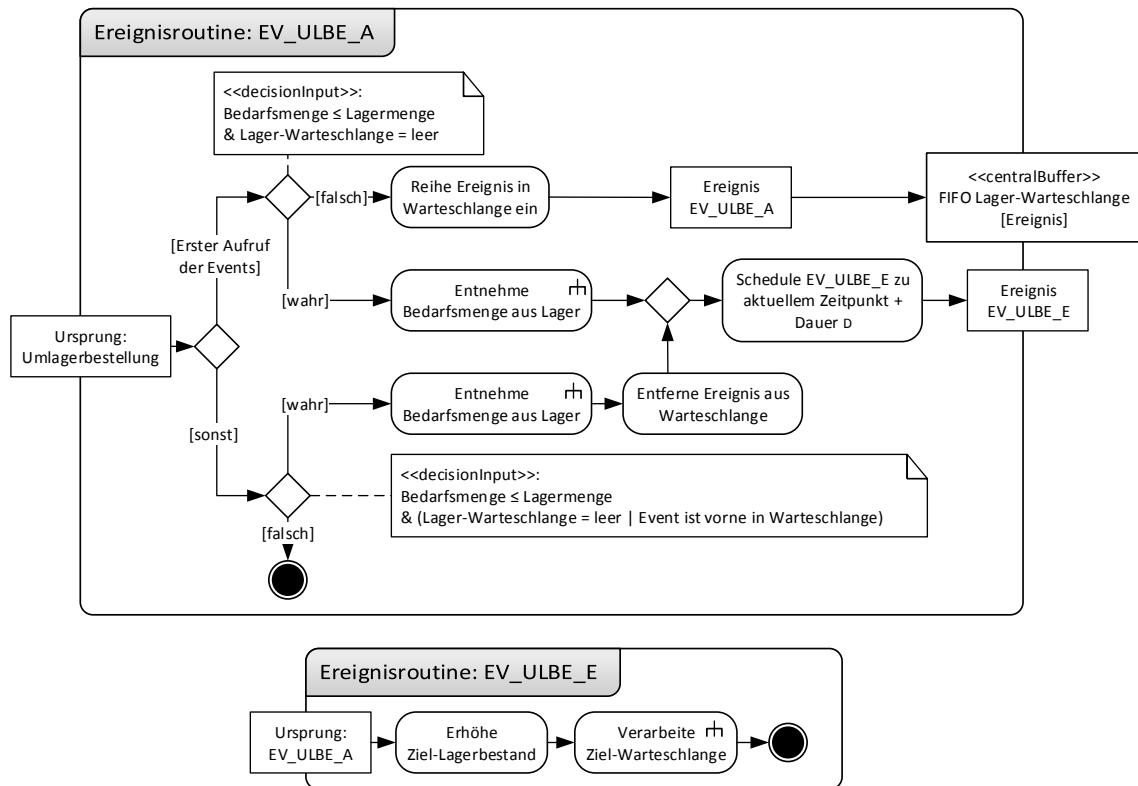


Abbildung 5.11: Ereignisroutinen für Umlagerbestellungen

Für das Endereignis einer Umlagerbestellung werden die gleichen Schritte wie für das Ende einer Bestellanforderung durchgeführt. Beide Routinen sind in Abbildung 5.11 dargestellt.

5.1.4.4.4 Ereignisroutinen zu Fertigungsaufträgen

Wie in Abbildung 5.12 ersichtlich, entspricht die Startereignis-Routine für Fertigungsaufträge vom Konzept her der Routine der Umlagerbestellung. Jedoch kann ein Fertigungsauftrag verschiedene Materialien als Bedarf enthalten. Die Materialien, die vorhanden und bezugsberechtigt sind, werden in diesem Fall direkt entnommen und der Bedarf als bedient gekennzeichnet. Für nicht erfüllte Bedarfe wird das Ereignis entsprechend in die Warteschlangen eingereiht. Erfolgt ein erneuter Aufruf, so werden nur die Materialien entnommen, in denen das Ereignis bezugsberechtigt ist. Dies geschieht so lange, bis alle Bedarfe erfüllt wurden. Erst dann wird der Endtermin unter Einbezug der Terminabweichungs-Verteilungen berechnet, wodurch auch hier sichergestellt ist, dass kein Fertigungsauftrag mit unerfüllten Bedarfen begonnen wird. Die Routine für das Endereignis entspricht dem bisherigen Vorgehen.

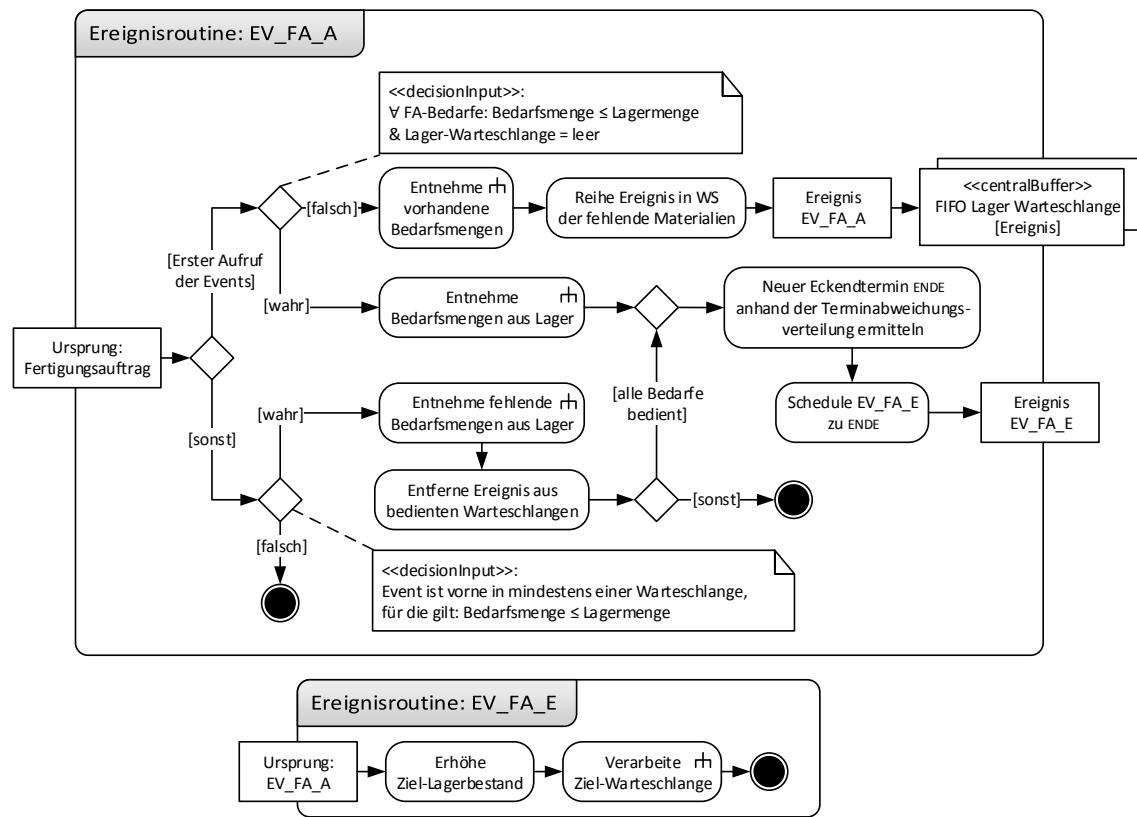


Abbildung 5.12: Ereignisroutinen für Fertigungsaufträge

5.1.4.4.5 Ereignisroutinen zu Kundenaufträgen

Abbildung 5.13 zeigt die Ereignisroutinen für Kundenaufträge. Dabei agiert die Routine für das Startereignis identisch zu der des Fertigungsauftrags. Sind an dieser Stelle jedoch alle Bedarfe erfüllt, so wird das Endereignis zum gleichen Zeitpunkt eingeplant, da dessen Routine der Aktualisierung der Statistikvariablen des Terminverzugs dient.

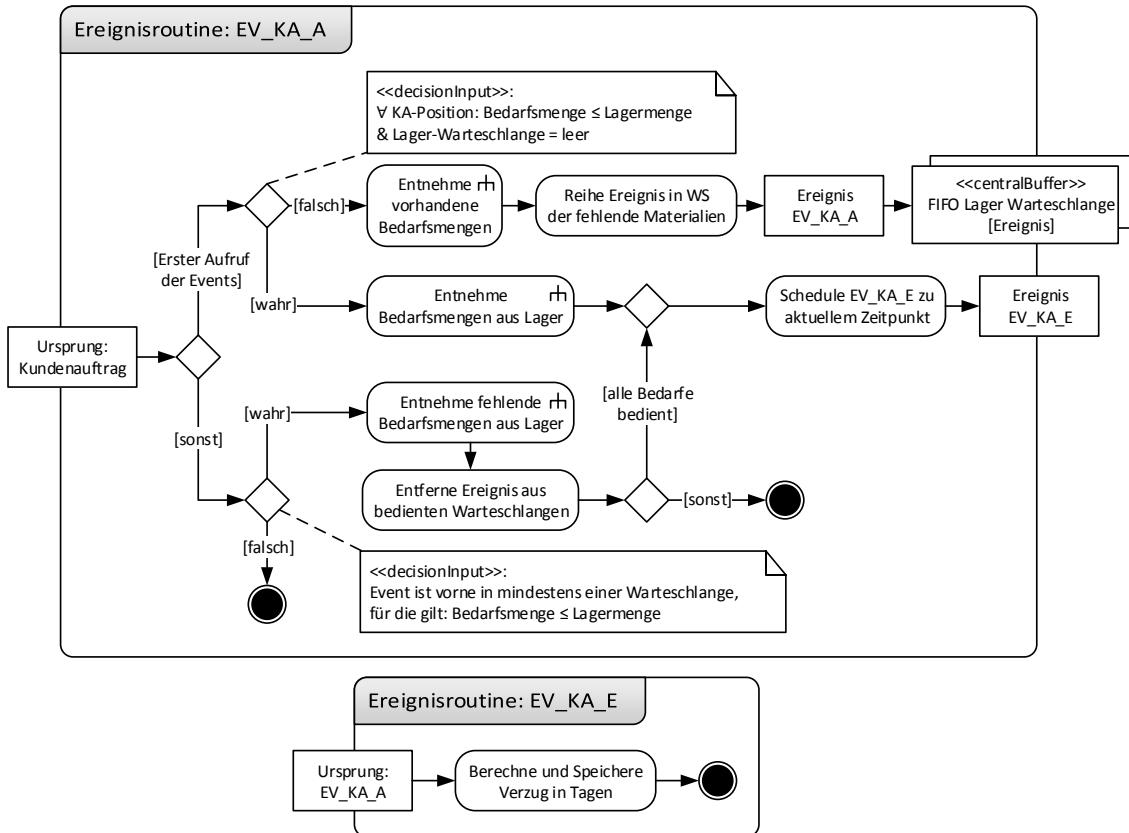


Abbildung 5.13: Ereignisroutinen für Kundenaufträge

5.1.4.4.6 Ereignisroutinen zum Sicherheitsbestand

Jede Information zu einem Sicherheitsbestandsaufbau erzeugt ein entsprechendes Event *EV_SB_E*, durch das der Materialbestand erhöht wird²⁷³. Die Routine aus Abbildung 5.14 stellt den Ablauf dar. Die Zustandsvariablen Materialbestandshöhe und Sicherheitsbestandslevel werden entsprechend erhöht und die Verarbeitung der Lagerwarteschlange angestoßen.

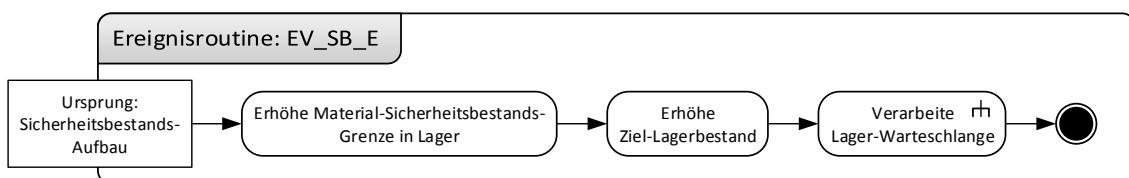


Abbildung 5.14: Ereignisroutine für den Zugang von Sicherheitsbestand

²⁷³ An dieser Stelle wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass der Sicherheitsbestand pünktlich verfügbar ist. Der Aufbautermin kann, wenn gewünscht, jedoch auch von den Terminabweichungen beeinflusst werden. Dazu muss dann nur analog zu den Bestellanforderungen ein zusätzliches Anfangsergebnis erzeugt werden. Dieses legt dann anhand der Terminabweichungen das Datum des Endereignisses fest. Alternativ kann für einen positiven Wert des Sicherheitsbestands-Vorlaufs auch eine Untergrenze festgelegt werden, die größer als die bisher maximal beobachteten Abweichungen des jeweiligen Materials ist.

5.1.4.4.7 Hilfsroutinen

Die Hilfsroutinen dienen der vereinfachten Darstellung der vorhergehenden Routinen. Abbildung 5.15 zeigt die Verarbeitung der Lagerwarteschlange, die bei einem Zugang angestoßen wird. Wenn Ereignisse in der Warteschlange vorhanden sind, wird geprüft, welche mit dem neuen Bestandslevel bedient werden können. Diese werden jeweils zum aktuellen Zeitpunkt eingeplant. Die Entnahme aus der Warteschlange erfolgt dabei, aufgrund von möglichen Interdependenzen und den dadurch potentiell möglichen Planauftragsarbeiten trotz unvollständigen Bedarfen, erst bei einer erfolgreichen Entnahme aus dem Lager.

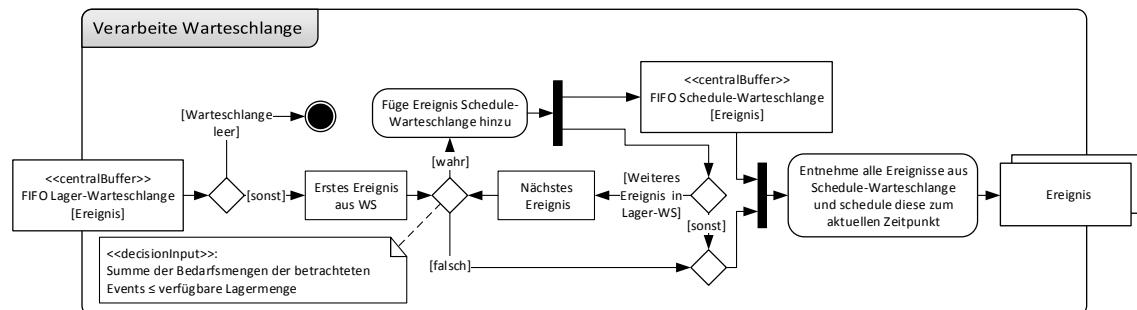


Abbildung 5.15: Hilfsroutine für die Warteschlangenlogik

Zur Lagerentnahme und zur Ermittlung der Bedarfe können die Vorgänger-Beziehungen der Planaufträge genutzt werden, wodurch eine Abbildung von Stücklisten entfällt. Dadurch wird die implizite Modellgenerierung aus dem MRP-Ablaufplan vereinfacht. Für die bedienbaren Bedarfe werden die entsprechenden Vorgänger an die Hilfsfunktion aus Abbildung 5.16 übergeben. Diese entnimmt die entsprechenden Mengen aus den korrekten Lagerorten. Ist ein Vorgänger-Planauftrag für den Sicherheitsbestandsabbau markiert, so wird zusätzlich die Sicherheitsbestandsgrenze um die jeweilige Menge reduziert.

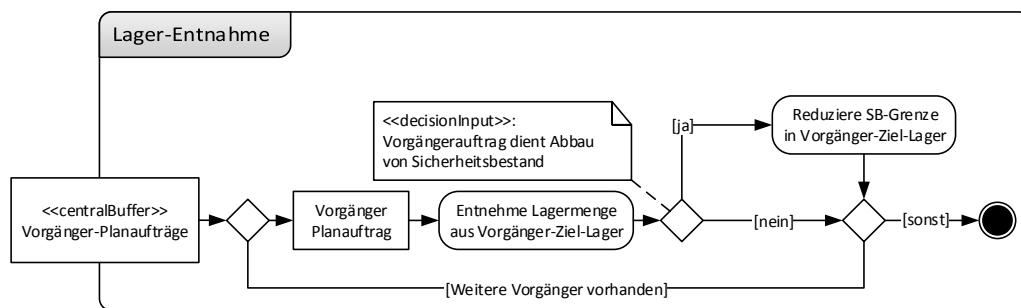


Abbildung 5.16: Hilfsroutine für die Materialentnahme aus dem Lager

5.1.5 Automatisiertes Auswahlverfahren

Aus der zuvor generierten Pareto-Menge muss eine zu realisierende Lösung ausgewählt werden. Da die MRP-Pläne in regelmäßigen, meist kurzen Abständen generiert werden, geschieht dies zur Reduzierung des Aufwands für menschliche Planer standardmäßig automatisiert. Zur Steuerung der automatisierten Auswahl müssen die verfolgten Ziele, die den Präferenzen des Unternehmens entsprechen, klar definiert sein.

Ausgehend davon, dass die Präferenzen in Form einer taktischen Zielvorgabe t für die Liefertreue existieren, eignet sich besonders das vorgestellte Goal Programming zur Realisierung des Auswahlverfahrens. Weil bei der Liefertreue die taktische Zielvorgabe eine Minimalvorgabe ist, werden nur die Unterschreitungen betrachtet. Unter der vorläufigen Annahme, dass alle abzusichernden Aufträge als gleichwertig betrachtet werden, lässt sich so für i Ziele folgende Auswahlfunktion aufstellen²⁷⁴:

$$\min \Psi_{\text{akt}}(\bar{x}) = \sum_i (n_i) = \sum_i (\max(0\%; t - E(LT_i))) \quad (5.25)$$

Dadurch werden alle Aufträge gleichmäßig dem vorgegebenen Zielwert angenähert. Die Funktion berücksichtigt jedoch keine intraprojektbezogenen Dependenzen. Weil aus Kundensicht die Liefertreue jedoch je langfristigem Projekt betrachtet wird, müssen vergangene Liefertreuewerte mit in die Auswahlentscheidung einfließen.

Tabelle 5.4: Auftragsbeispiel zur automatischen Lösungsauswahl

Projekt	Bisherige		Liefertreue je			Erwartete Liefertreue (Alternativen)				
	Liefertreue	vergangenen Auftrag	L1	L2	L3	L4				
P1	50%	0	1	0	1		80%	60%	40%	50%
P2	100%	-	-	1	1		75%	20%	30%	25%
P3	0%	-	0	0	0		10%	60%	90%	80%

Im Beispiel aus der oben stehenden Tabelle werden drei Projekte mit einer unterschiedlichen Anzahl bereits realisierter Lieferungen betrachtet. Beispielsweise wurden im Projekt 1 in der Vergangenheit vier Lieferungen durchgeführt, wovon nur zwei liefertreu waren. Unter der Annahme, dass für jedes Projekt nun ein weiterer Auftrag abzusichern ist, wird die Pareto-Menge durch die Alternativen L1 bis L4 dargestellt. Diese geben die erreichbaren erwarteten Liefertreuewerte für den Auftrag in jedem Projekt an. Da Projekt 2 bisher immer liefertreu war, in Projekt 3 jedoch noch keine pünktliche Lieferung erfolgte,

²⁷⁴ Da durch den Einsatz der Maximum-Metrik die Auswertungsfunktion durch Aufträge, die fast nicht abzusichern sind, unbrauchbar wird, erfolgt der Einsatz der L1-Metrik.

sollte die Verteilung der begrenzten Mittel, also der Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten, so erfolgen, dass bevorzugt Projekt 3 abgesichert wird. Um das zu erreichen, werden die durchschnittlichen, zuvor erreichten Liefertreuewerte in den Projekten als Gewichtung mit aufgenommen:

$$\min \Psi_{\text{hist}}(\bar{x}) = \sum_i (\max(\alpha_{\min}; 100\% - LT_p) \times \max(0\%; t_p - E(LT_i))) \quad (5.26)$$

Die Gewichtung erfolgt anhand der Invertierung der vergangenen Projektliefertreue LT_p . Aufträge aus Projekten mit 0%-Liefertreue erhalten so eine Gewichtung von 1, Aufträge aus bisher liefertreuen Projekten eine von 0. Damit diese nicht komplett aus der Bewertung entfallen, was zu unerwünschten starken Schwankungen der Liefertreue führt, kann zusätzlich eine Untergrenze α_{\min} definiert werden.

Da die Liefertreue von den Kunden subjektiv als extrem schlecht empfunden wird, wenn mehrere Lieferungen nacheinander fehlschlagen, werden die nachfolgenden Aufträge für solche Lieferungen nicht nur an die allgemeine Zielvorgabe t angenähert, sondern es wird versucht die nächste Lieferung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit pünktlich zu realisieren. Dazu wird die Vorgabe t durch eine projektspezifische Vorgabe t_p ersetzt. Diese entspricht, wie in Formel (5.27) dargestellt, im Regelfall der taktischen Vorgabe, wird aber ab einer parametrisierbaren Anzahl an aufeinanderfolgenden unpünktlichen Lieferungen auf 100% gesetzt²⁷⁵.

$$t_p = \begin{cases} 100\%, & \text{Wenn } n \text{ letzten Lieferungen unpünktlich} \\ t, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.27)$$

Dadurch wird die Auswahl anhand einer langfristigen und ausgleichenden Betrachtung der Liefertreue vorgenommen. Sind nicht alle Aufträge mit dem gesetzten Budget ausreichend abzusichern, so werden in der Vergangenheit untreu belieferte Kunden bevorzugt, wobei das Risiko der Lieferuntreue auf zuvor treuer belieferte Kunden übertragen wird.

Bezogen auf das Beispiel aus Tabelle 5.4, ergeben sich für eine Zielvorgabe von $t = 70\%$ und $\alpha_{\min} = 0,2$ folgende Zielfunktionswerte der Lösungen:

²⁷⁵ Alternativ könnten auch Lösungen ausgeschlossen werden, deren erwartete Liefertreuewerte zu gering sind. Nähert man sich jedoch den 100%, so kann ein Erzwingen dieser bei sehr großen und sehr unsicheren Aufträgen eine starke Verschlechterung aller anderen Liefertreuewerte nach sich führen. Dieses Erzwingen um jeden Preis wird durch die gewählte Integration vermieden.

Tabelle 5.5: Finale Lösungsauswahl in Abhängigkeit der Gewichtung

Lösung	Ohne Gewichtung	Mit Gewichtung	Mit Gewichtung
		(ohne t_i)	(mit t_i)
L1	60%	60%	90%
L2	70%	25%	55%
L3	70%	23%	33%
L4	65%	19%	39%
Gewählt:	L1	L4	L3

Werden die vergangenen Liefertreuewerte nicht berücksichtigt, so wird Lösung L1 bevorzugt. Diese führt jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer erneuten untreuen Lieferung in Projekt P3. Werden vergangene Liefertreuewerte mit einbezogen, fällt die Auswahl auf L3 und L4, wobei individuelle Zielvorgaben t_i zur Auswahl der Lösung mit höheren Zielfunktionswerten für das dauerhaft untreue Projekt P3 führen.

5.1.6 Manuelles Auswahlverfahren

Existieren aufgrund besonderer Umstände, wie beispielsweise der Erringung eines strategischen Auftrags, Abweichungen von den Präferenzen des automatischen Auswahlverfahrens, so kann dieser Schritt auch manuell durch einen Planer durchgeführt werden. Zusätzlich kann das manuelle Verfahren auch zur detaillierten Analyse der Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten genutzt werden.

Da das in Kapitel 3.3.2.2 vorgestellte Auswahlverfahren bereits seine Eignung für produktionsbasierte Fragestellungen bewiesen hat, wird dieses als Grundlage für den manuellen Auswahlprozess verwendet. Durch die speziellen Eigenschaften der Liefertreue als Maßeinheit für jedes Ziel, ist eine Definition von Obergrenzen nicht mehr notwendig. Aufgrund besonderer Umstände, wie beispielsweise der Insolvenz eines Lieferanten, kann jedoch schon frühzeitig bekannt sein, dass davon betroffene Aufträge unpünktlich sein werden. Deswegen existiert die Möglichkeit, Aufträge von der Verteilung der Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten auszunehmen. Dazu wird der Ablauf des Prozesses wie folgt modifiziert:

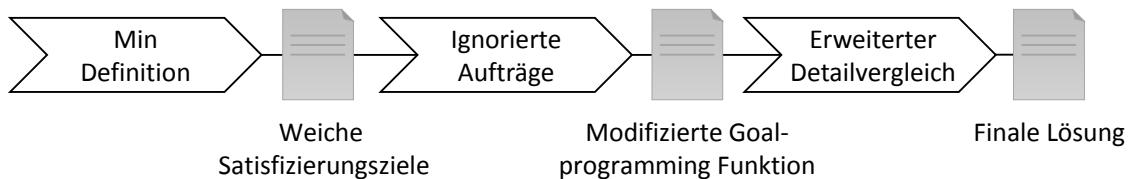


Abbildung 5.17: Manueller Prozessablauf

Durch den manuellen Eingriff erfolgt in den ersten beiden Schritten eine Triage der Aufträge. Zuerst können Minimalwerte für die erwartete Liefertreue von Aufträgen, die aufgrund von Sonderentscheidungen eine höhere Präferenz bezüglich der Einhaltung der Liefertreue erhalten, festgelegt werden. Der definierte Minimalwert wird dadurch als Satisfizierungsziel betrachtet, dessen Anspruchsniveau erreicht werden sollte. Anschließend können die Aufträge gekennzeichnet werden, die durch das Verfahren nicht mehr abgesichert werden sollen.

Nach Abschluss dieser Schritte wird das aus Abbildung 3.9 bekannte Auswahlinterface angezeigt. Alle Lösungen werden nach den Zielwerten der modifizierten Goal-Programming-Funktion sortiert, wobei das Gewicht für ignorierte Aufträge auf null gesetzt wird. Lösungen, die den Präferenzen entsprechen, werden dadurch zuerst angezeigt. Aber auch Lösungen, die nicht die zuvor definierten Satisfizierungsziele erfüllen, werden weiterhin angezeigt und wie bisher farblich abgesetzt gekennzeichnet. So ist gewährleistet, dass ein Planer mögliche Trade Offs erkennen kann und eine gute Lösung, die das definierte Niveau nur minimal verfehlt, nicht verwirft.

Da in jedem Schritt nur bestimmte Entscheidungen endgültig fixiert werden (siehe anschließendes Kapitel), werden die betroffenen Ziele in der Spaltenreihenfolge nach vorne gestellt und entsprechend gekennzeichnet. So kann eine bessere Fokussierung des Planers auf die zu diesem Zeitpunkt relevanten Aufträge erfolgen.

Um dem Planer die Möglichkeit zu geben gezielter Trade Offs und Ansatzpunkte für weitere prophylaktische Maßnahmen zu identifizieren, wird die reine Zielwertanzeige noch um detaillierte Informationen zu den Entscheidungsvariablen ergänzt. Zu jeder Lösung lassen sich die Verläufe der Sicherheitsbestände und die Sicherheitszeiten je Planauftrag und Material anzeigen, wodurch beispielsweise besonders häufig abgesicherten Materialien ersichtlich sind.

5.1.7 Berücksichtigung der rollierenden Planung

Die Optimierung der Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten wird an die rollierende Ausführung des MRP-Verfahrens angepasst. Da zur Vermeidung von Abbildungsfehlern nicht die komplette MRP-Logik nachgebildet wird, muss die Integration nach einem MRP-Lauf erfolgen. Dazu existieren prinzipiell zwei Möglichkeiten. Zum einen kann das Verfahren mit möglichst kurzer Laufzeit ausgeführt werden, sodass die verwendeten MRP-Ergebnisse noch vor ihrer Freigabe direkt modifiziert werden. Da jedoch die Laufzeit essenziell zu Verbesserung der Ergebnisqualität beiträgt und das betrachtete System nur wenigen Änderungen und keinen Kapazitätsbeschränkungen unterworfen ist, können

die Ergebnisse auch erst in den nächsten MRP-Planungslauf einfließen. Dies hat den Vorteil, dass zwischen beispielsweise wöchentlichen MRP Zyklen eine ausreichende Laufzeit zur Verfügung steht. Nachteilig ist nur die verzögerte Reaktionszeit auf Änderungen. Kommen Aufträge zwischen den Planungsläufen hinzu, die kurz vor der Frozen Zone liegen, so werden diese nicht mehr explizit berücksichtigt. Entfallen Aufträge kurz vor der Frozen Zone, wird deren Anteil am Budget nicht neu vergeben. Da diese Nachteile sich jedoch nur negativ auf Auftragsänderungen innerhalb einer kleinen Zeitspanne zwischen zwei MRP-Planungsläufen auswirken, überwiegen die Vorteile durch die längere Laufzeit.

Zur Integration werden die Planungsparameter des MRP hinsichtlich der rollierenden Planung übernommen. Dazu zählen Planungshorizont, Planabstand und Frozen Zone²⁷⁶. Die Frozen Zone des Absicherungsverfahrens ist wegen der Integration in den nächsten Planungslauf jedoch um einen Planabstand länger. Um den dynamischen Abbau von projektspezifischen Sicherheitsbeständen zu gewährleisten, muss der Planungshorizont des MRP-Verfahrens jedoch ausreichend lang gewählt sein. Ist dies nicht der Fall, sollte der manuelle Auswahlprozess mit ausreichender Vorlaufzeit vor Projektausläufen genutzt werden, um geeignete Abbaulösungen zu präferieren.

Nach jeder Iteration des Verfahrens werden entsprechend alle Sicherheitsbestandsänderungen und Sicherheitszeiten ins System übertragen, die in der nächsten Iteration in die Frozen Zone fallen. Für den Aufbau von Sicherheitsbestand ist dies trivial. Bei Abbauentscheidungen oder Sicherheitszeiten müssen jedoch die Interdependenzen zwischen den Entscheidungen berücksichtigt werden. Dazu wird ein Kundenauftrag wie in Abbildung 5.18 betrachtet.

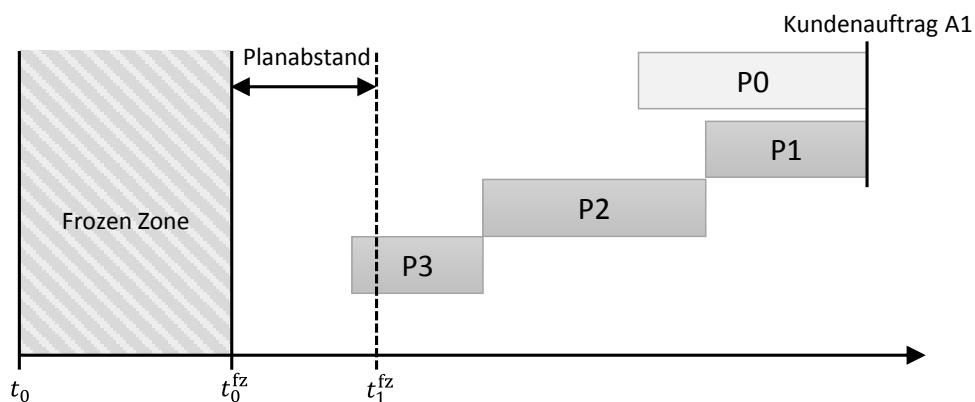


Abbildung 5.18: Fixierung von Entscheidungen bei Eintritt in die Frozen Zone

²⁷⁶ Dazu wird an dieser Stelle angenommen, dass die Frozen Zone für alle Artikel gleich ist und mindestens so lang, wie die größte maximale Wiederbeschaffungszeit der zu planenden Produkte.

Werden in dem Beispiel einer oder mehrere der drei Planaufträge P1 bis P3 mit einer Sicherheitszeit versehen, wodurch der Start von Planauftrag P3 zum nächsten Planungszeitpunkt t_1 innerhalb der Frozen Zone liegt, so müssen die Entscheidungen für die gesamte Kette bis hin zum Planauftrag P1 fixiert und übertragen werden. Das gilt ebenso, wenn beispielsweise P1 dem Sicherheitsbestandsabbau dienen soll. Diese Entscheidung muss nach dem Planungslauf zum Zeitpunkt t_0 fixiert werden, da ansonsten P3 und P2 bei einer Revidierung im nächsten Planungsschritt nicht mehr rechtzeitig ausgeführt werden können.

5.2 Reaktives Verfahren

Tritt eine Störung innerhalb der Frozen Zone auf, kann das proaktive Verfahren nicht mehr darauf reagieren. Als Alternative zu dem in der Praxis oft implizit verwendeten Right-Shift-Ansatz wird an dieser Stelle der Entwurf eines reaktiven Frameworks vorgestellt, das die Auswirkungen von eingetretenen Störungen, also Verspätungen im regulären Planablauf, minimiert.

Durch die Anwendung des prädiktiv-reaktiven Rescheduling-Konzepts wird zunächst durch das proaktive Verfahren periodisch ein Präventivpotenzial in Form von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten aufgebaut. Ergänzend dazu wird eventbasiert das reaktive Verfahren ausgelöst, was insgesamt zu einem hybriden Rescheduling führt. Für die Beschreibung des reaktiven Verfahrens eignet sich dabei das Konzept des Fehlteilmanagements, das die Konsequenzen eines durch Verspätungen ausgelösten Fehlteils minimiert. Dazu wird unter anderem auf das aufgebaute Präventivpotenzial, in diesem Kontext auch als Elastizität bezeichnet, zurückgegriffen. Aufgrund des Fokus auf die Kundenzufriedenheit sind vor allem die externen Konsequenzen zu bewerten und zu minimieren, also die negativen Auswirkungen auf die Liefertreue der betroffenen Aufträge und Projekte. Zusätzlich müssen für eine vollständige Bewertung auch die entstehenden Kosten, beispielsweise in Form von Pönalen, berücksichtigt werden.

Der in Abbildung 5.19 beschriebene Ablauf des Verfahrens entspricht dem klassischen Vorgehen des reaktiven Rescheduling aus Kapitel 3.2.1.3:

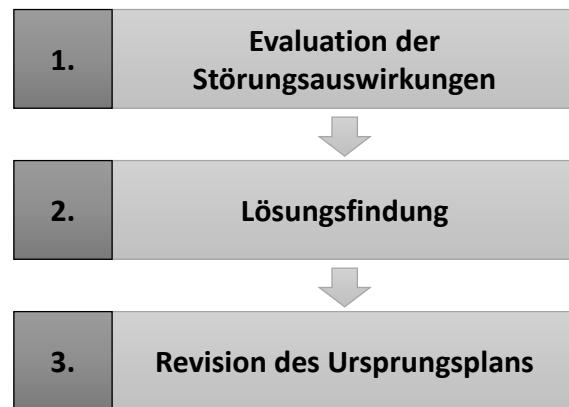


Abbildung 5.19: Ablaufschema des reaktiven Verfahrens

In der ersten Phase wird die Wirkungskette der Störung ermittelt. Wenn das Präventivpotenzial ausreicht, um die Störung vollständig abzufangen, terminiert das Verfahren. Ansonsten werden in der Lösungfindungsphase mögliche Handlungsalternativen ermittelt und bezüglich ihrer Auswirkungen evaluiert. Aus diesen Lösungen wird anhand der Prä-

ferenzen des Planers beim Vergleich der in- und externen Konsequenzen eine zu realisierende Alternative gewählt. Abschließend erfolgt die Umsetzung der gewählten Alternative durch die Revision des ursprünglichen Plans²⁷⁷.

Für jede Phase lassen sich beliebig komplexe Verfahren entwickeln. Nachfolgend werden einige einfache Verfahren für jeden Schritt vorgestellt, die die Besonderheiten bei der Ausnutzung des Präventivpotenzials exemplarisch aufzeigen.

5.2.1 Evaluation der Störungsauswirkungen

Bei Eintritt der Störung müssen zuerst die Auswirkungen identifiziert werden. Nur wenn sich eine Störung vollständig und ohne Kosten durch das Präventivpotenzial beheben lässt, sind keine weiteren Aktionen mehr notwendig.

Ein Fehlteil in einem Kundenauftrag oder Planauftrag wird durch eine Verspätung aufgrund der Schwankungen der Durchlauf- und Wiederbeschaffungszeiten erzeugt. Der realisierte Endtermin eines Planauftrags t_{Neu}^P weicht also vom geplanten Endtermin t_{Plan}^P ab. Die Auswirkungen ergeben sich in Abhängigkeit von den in Abbildung 5.20 dargestellten Terminen.

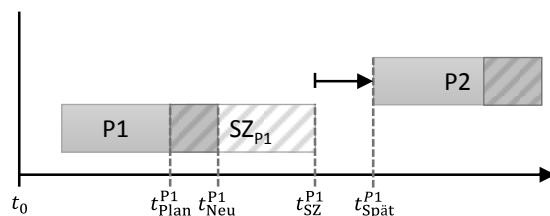


Abbildung 5.20: Termingrenzen bei Verspätungen von Planaufträgen

Wurde dem betroffenen Planauftrag zuvor eine Sicherheitszeit zugeordnet, so ist t_{Plan}^P um die Größe der Sicherheitszeit vorgezogen und der ursprünglich geplante Fertigstellungstermin ist der Zeitpunkt t_{SZ}^P . Liegt der neue Termin zeitlich vor t_{SZ}^P , so ist die Störung ohne Auswirkungen auf die Liefertreue und der ursprüngliche Plan kann weiter durchgeführt werden. Da ein unkapazitisiertes System betrachtet wird, gilt dies auch bei Planaufträgen, deren Nachfolger Sicherheitszeiten haben, wie der im Beispiel dargestellte Planauftrag $P2$. Dieser hätte aufgrund einer Sicherheitszeit zum Zeitpunkt t_{SZ}^{P1} starten sollen, kann aber aufgrund der Ausnutzung der eigenen Sicherheitszeit noch zum spätestens möglichen Zeitpunkt $t_{\text{Spät}}^{P1}$ starten, ohne dass der Auftragsendtermin abweicht. Liegt t_{Neu}^{P1} vor diesem Zeitpunkt, so hat die Störung vorerst keine negativen Auswirkungen auf die

²⁷⁷ Da die konkrete Implementierung abhängig vom spezifisch eingesetzten Produktionsplanungs- und Steuerungssystem ist, wird diese nachfolgend nicht weiter detailliert.

Liefertreue. Nachteilig ist jedoch der Verlust des Präventivpotenzials für Störungen bei der Durchführung von $P2$.

Gilt $t_{\text{Neu}}^{P1} > t_{\text{Spät}}^{P1}$, kann versucht werden, auf einen Sicherheitsbestand zuzugreifen. Ist im Ziellager von $P1$ zum Zeitpunkt $t_{\text{Spät}}^{P1}$ ausreichend Sicherheitsbestand für die Erfüllung der Bedarfe von $P2$ vorhanden, hat die Störung keine weiteren Auswirkungen. Trifft der Materialzugang durch die Fertigstellung von $P1$ ein, wird dieser zum Wiederauffüllen des Sicherheitsbestands verwendet.

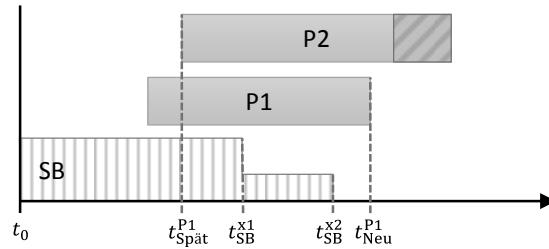


Abbildung 5.21: Verwendung des dynamischen Sicherheitsbestands

Ob ausreichend Sicherheitsbestand verfügbar ist, ist aufgrund der Dynamik abhängig von zukünftigen Abbau-Aufträgen für diesen Sicherheitsbestand. Wie in Abbildung 5.21 dargestellt, können zwischen dem Bedarfstermin, an dem der Sicherheitsbestand angegriffen wird, und dem Zugangstermin des verspäteten Planauftrags mehrere Reduktionen des Sicherheitsbestands stattfinden. Ein störungsfreier Zugriff auf den Sicherheitsbestand zum Zeitpunkt $t_{\text{Spät}}^{P1}$ ist nur möglich, wenn gilt:

$$\forall t \text{ mit } t_{\text{Spät}}^{P1} \leq t \leq t_{\text{Neu}}^{P1}: sb_{mlt} \geq e^{P1} \quad (5.28)$$

Der Sicherheitsbestand muss unter Abzug der benötigten Menge für die rechtzeitige Bedienung von $P2$ zu jedem Zeitpunkt größer null sein. Nur so kann garantiert werden, dass keine weiteren Sekundärstörungen ausgelöst werden. Alternativ kann der Sicherheitsbestand auch schon zum ursprünglich geplanten Startzeitpunkt des Folgeauftrags t_{SZ}^{P1} genutzt werden, die Formel gilt dann entsprechend ab diesem Zeitpunkt als untere Grenze.

Treffen die beschriebenen Bedingungen weder für Sicherheitszeiten noch für Sicherheitsbestände zu, kann die Störung nicht direkt und ohne Kosten durch das Präventivpotenzial kompensiert werden. Dadurch tritt das reaktive Verfahren in die zweite Phase ein.

5.2.2 Lösungsfindung

Wirkt sich eine Störung trotz Einsatz des unmittelbar verfügbaren Präventivpotenzials negativ aus, so können zusätzliche Sanierungsmaßnahmen eingesetzt werden.

5.2.2.1 Transfer von Sicherheitsbeständen

Zuvor wurde nur der Sicherheitsbestand des jeweils betroffenen Lagerorts betrachtet, was in den meisten Fällen, bei nur einem oder wenigen Konsolidierungslagern, ausreichend ist. In den Fällen, in denen Sicherheitsbestand für das gleiche Material an verschiedenen Lagerorten zur Verfügung steht, aber die individuellen Mengen alleine nicht ausreichen, kann als Sanierungsmaßnahme eine Konsolidierung der Sicherheitsbestände durchgeführt werden. Dabei gelten die gleichen Annahmen wie zuvor bezüglich der Verfügbarkeit der Sicherheitsbestände.

Wird zum Ausgleich des verspäteten Planauftrags die benötigte Menge durch Konsolidierung beschafft, müssen die entstehenden Kosten und Transportzeiten durch notwendige Umlagerungen entsprechend berücksichtigt werden²⁷⁸. Lösungen, bei denen die Konsolidierung vor dem spätesten möglichen Endtermin des Planauftrags erfolgen kann, erreichen eine sekundärstörungsfreie Auflösung der Verspätung zum Preis der summierten Transportkosten.

Erfolgt die Konsolidierung nach dem spätesten Termin aber vor dem neuen Liefertermin des Planauftrags, so erhöhen sich die Kosten um mögliche Pönalen je Tag für die Ver-spätung des betroffenen Kundenauftrags.

5.2.2.2 Partielles Rescheduling der betroffenen Aufträge

Reichen die vorhandenen Sicherheitsbestände oder Sicherheitszeiten nicht aus, um einen verspäteten, aber priorisierten Auftrag pünktlich auszuliefern, kann durch Änderung der Versorgungsreihenfolge der Aufträge eine Verbesserung erreicht werden. Dies entspricht einer Umwidmung des oder der ursprünglich für einen anderen Auftrag geplanten Zugangs.

²⁷⁸ Vgl. Kapital-Nebenbedingung.

An dieser Stelle wird die Berücksichtigung von Sicherheitszeiten und Sicherheitsbeständen anhand eines Tauschverfahrens auf Produktebene skizziert²⁷⁹. Unter der Annahme, dass eine Situation wie in Abbildung 5.22 vorliegt, ist eine Verbesserung der Liefertreue des Prioritätsauftrags $E1$ durch ein Vorziehen in der Bedarfsreihenfolge vor Auftrag $A2$ möglich.

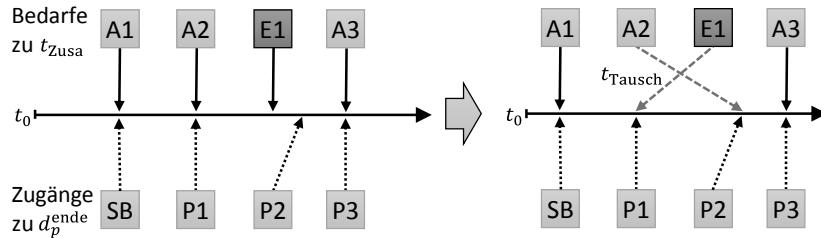


Abbildung 5.22: Beispiel für ein partielles Rescheduling

Dabei muss für einen erfolgreichen Tausch zu einem Zeitpunkt t_{Tausch} ein für die Erfüllung von $E1$ ausreichender Materialbestand vorhanden sein. Dieser setzt sich durch die von den getauschten Planaufträgen gelieferten Menge e^{P2} und dem Sicherheitsbestand zusammen²⁸⁰. An dieser Stelle kann die Reihenfolge auch mit Planaufträgen für den Abbau von Sicherheitsbestand getauscht werden.

Beim partiellen Rescheduling werden zuerst alle möglichen Bedarfsreihenfolgen durch die Permutation der Aufträge aus dem Intervall $[t_0, t_{Neu}^P]$ erstellt. Dabei stellt t_{Neu}^P den neuen Liefertermin des verspäteten Planauftrags dar. Für die Ausgangsreihenfolge und alle weiteren Permutationen erfolgt die Berechnung der voraussichtlich erreichten Realisierungstermine t_{Ist} der betroffenen Kundenaufträge, der daraus resultierenden Liefertreuwerte sowie der durch Pönalen entstehenden Kosten²⁸¹.

5.2.2.3 Auswahl aus Handlungsalternativen

Alle für den Lösungsfindungs-Schritt implementierten Verfahren erzeugen eine oder mehrere Handlungsalternativen mit Informationen zu den neuen Liefertreuwerten und

²⁷⁹ Zur Verdeutlichung der Nutzungsmöglichkeiten wird nur ein einfaches Rescheduling Verfahren vorgestellt. Es können jedoch beliebig komplexe Verfahren, beispielsweise über mehrere Produktionsstufen hinweg, ergänzt werden.

²⁸⁰ Aufgrund des kurzfristigen Horizonts wird von einer expliziten Betrachtung der Unsicherheit abgesehen und die jeweiligen Termine werden als fix angenommen. Dies kann im praktischen Einsatz beispielsweise durch Aktualisierung der Terminbestätigungen der betroffenen Aufträge bei Eintritt der Störung unterstützt werden.

²⁸¹ Dabei profitiert das Verfahren auch von Komplettlieferungen und Kits, die bereits durch andere Auftragspositionen verspätet sind.

den entstehenden Kosten. Diese Menge wird ergänzt um die Ausgangslösung, die keine expliziten Änderungen im Planablauf vornimmt, sondern einen Right-Shift durchführt. Anschließend werden alle dominierten Lösungen entfernt, was zum Erhalt der effizienten Pareto-Menge \mathcal{P}^* führt.

Anhand der Pareto-Menge ist es für einen Planer möglich, bei jeder Handlungsoption die in- und externen Auswirkungen klar zu erkennen. Bei Verspätungen im regulären Planablauf werden so die Trade-offs zwischen den noch erreichbaren Liefertreuewerten und den entstehenden Kosten ersichtlich, was eine fundierte Auswahl anhand der Präferenzen des Planers ermöglicht.

6 Implementierung

Nachfolgend wird die Implementierung des proaktiven Verfahrens in der Programmiersprache Java vorgestellt.

6.1 Abbildung des Szenarios

Für jede Entität des in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Szenarios existiert eine zugehörige Java-Klasse. Von dieser wird für jedes real vorhandene Objekt eine entsprechende virtuelle Objektinstanz erzeugt, dessen Datenvariablen die jeweiligen Eigenschaften enthalten. In Quelltext 6.1 wird exemplarisch die Repräsentation eines Projekts als Java-Klasse dargestellt.

```

01 public class Projekt extends Element {
02     private Kunde kunde;
03     private ArrayList<Kundenauftrag> kundenauftraege;
04
05     public Projekt(int pNr, String pName, Kunde pKunde) {
06         super(pNr, pName);
07         this.kunde = pKunde;
08         this.kundenauftraege = new ArrayList<Kundenauftrag>();
09     }
10
11     public Kunde getKunde() {
12         return kunde;
13     }
14
15     public void setKunde(Kunde kunde) {
16         this.kunde = kunde;
17     }
18
19     public ArrayList<Kundenauftrag> getKundenauftraege() {
20         return kundenauftraege;
21     }
22
23     public void addKundenauftrag(Kundenauftrag kundenauftrag) {
24         this.kundenauftraege.add(kundenauftrag);
25     }
26 }
```

Quelltext 6.1: Klasse Projekt

6.2 Implementierung der genetischen Komponenten

Zur Implementierung der genetischen Strategie wird das Framework *jMetal* eingesetzt²⁸². Dieses stellt eine einfach erweiterbare, objektorientierte Mehrzieloptimierungs-Umgebung zur Verfügung, in der bereits Implementierungen vieler Standardalgorithmen und -operatoren enthalten sind. Die wichtigsten Klassen des Frameworks sind in Abbildung 6.1 dargestellt

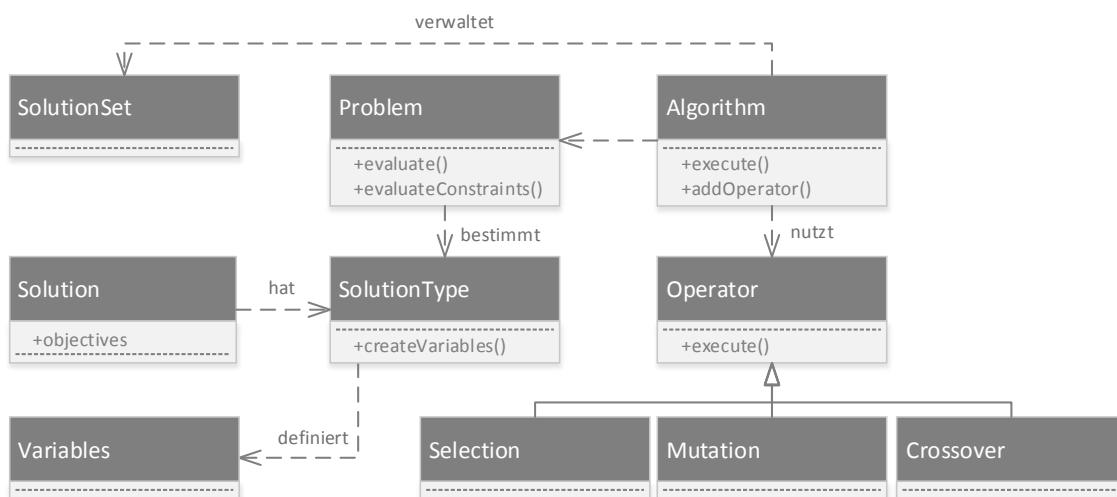


Abbildung 6.1: Struktur des *jMetal*-Frameworks

Ausgangspunkt ist ein Element der Klasse *Algorithm*, das eingesetzt wird, um ein *Problem* zu lösen, wobei entsprechende Generationen von Lösungen, dargestellt als *SolutionSet* mit einzelnen Lösungen als *Solution*, durch verschiedene Operatoren erzeugt werden. Der Ablauf der Optimierung wird in der *execute()*-Methode durch spezifische Implementierungen der *Algorithm*-Unterklassen festgelegt.

Die Repräsentation des Problems erfolgt in der Klasse *Problem*, die eine *evaluate()*-Methode bereitstellen muss, durch die ein *Solution*-Objekt hinsichtlich der Ziele bewertet wird. Abhängig vom implementierten Problem wird der verwendete *SolutionType* festgelegt, der der Kodierung des Chromosoms entspricht. Für jede Klasse von Operatoren muss eine spezifische Implementierung ausgewählt werden, die für den *SolutionType* geeignet ist.

²⁸² Siehe [DN11] und [DNA10].

6.2.1 Implementierung der Klasse **SBSZProblem**

6.2.1.1 Allgemeine Struktur und Initialisierung

Die Repräsentation des in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Modells erfolgt, wie in Abbildung 6.2 dargestellt, durch die *Problem*-Unterklasse *SBSZProblem*. Diese wird mit Informationen zum Szenario und den vorgegebenen Parametern in Form eines Objekts der Klasse *SBSZ-Parameter* initialisiert.

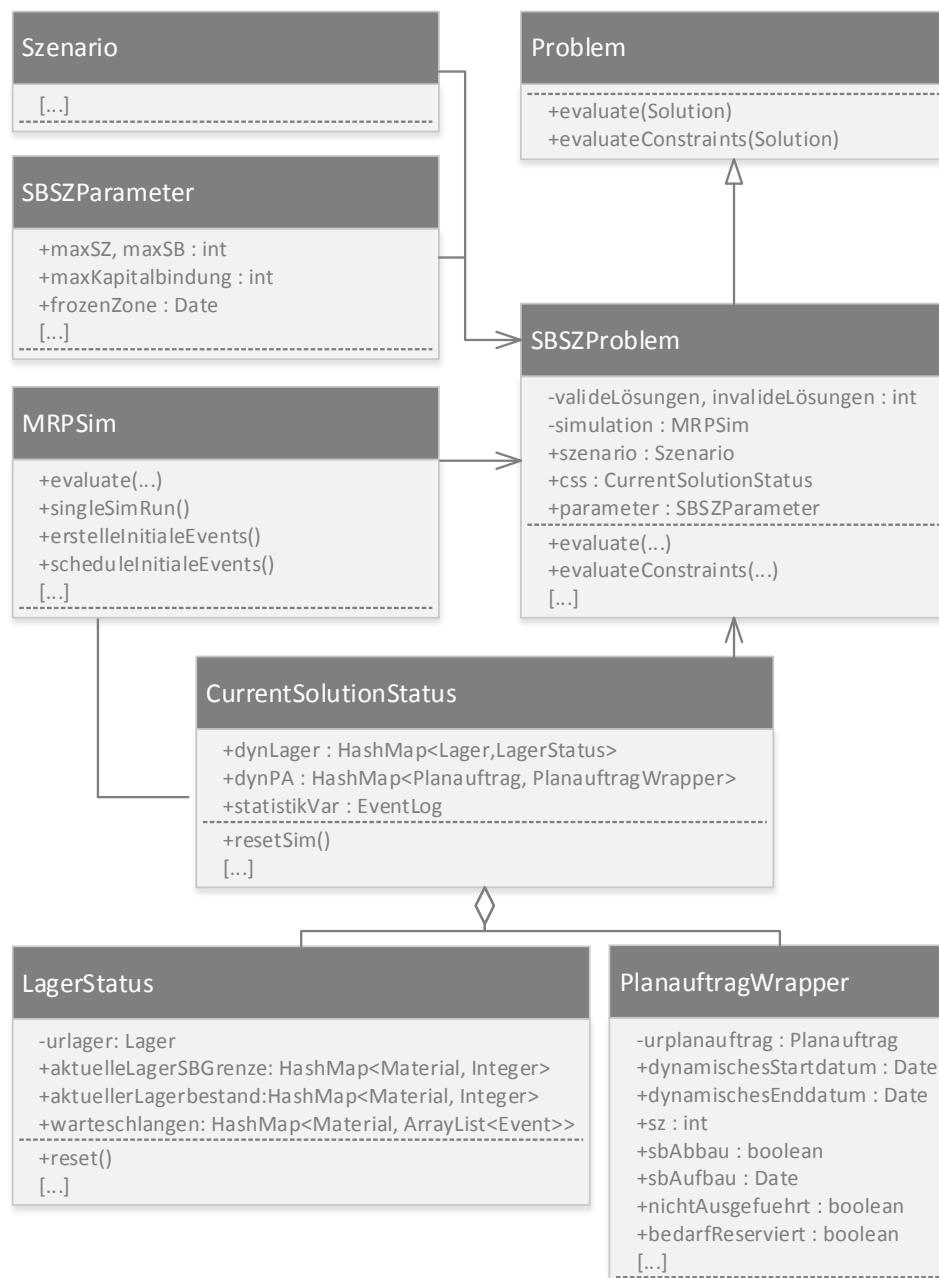


Abbildung 6.2: Klassenstruktur der Implementierung

Während der Initialisierung der Klasse *SBSZProblem* werden die im Chromosom enthaltenen Gene festgelegt. Dabei werden nur Planaufträge aufgenommen, für die ein Sicherheitsbestand oder eine Sicherheitszeit möglich und sinnvoll sind²⁸³. Da die definierten Gene nur ganzzahlige Werte annehmen können, werden diese durch Integer-Variablen abgebildet. Die Obergrenze von Sicherheitszeit-Genen wird auf die jeweils maximale beobachtete Verspätung des jeweiligen Materials reduziert. *jMetal* bietet zur Verwaltung von vielen ganzzahligen Genen den *ArrayIntSolutionType*, der bei der Implementierung eingesetzt wird. Zusätzlich wird zu Beginn die Simulationsumgebung *MRPSim* initialisiert.

6.2.1.2 Evaluierung einer Lösung

Bei Aufruf der *evaluate()*-Methode²⁸⁴ für eine spezifische Lösung erfolgt die Transition von Genotyp zu Phänotyp, indem die Werte der Gene ausgelesen werden und das Szenario entsprechend modifiziert wird. Dazu werden die Klassen *CurrentSolutionStatus*, *LagerStatus* und *PlanauftragWrapper* eingesetzt. Ein Objekt der Klasse *CurrentSolutionStatus* enthält eine Liste von *LagerStatus*-Objekten, in denen zu jedem Lager Informationen bezüglich der Materialbestände und Sicherheitsbestandsgrenzen gespeichert sind.

```

01 HashMap<Planauftrag, Integer> szInTagen
02                                     = new HashMap<Planauftrag, Integer>();
03 HashSet<Planauftrag> sbAbbau = new HashSet<Planauftrag>();
04 HashMap<Planauftrag, Integer> sbAufbau = new HashMap<Planauftrag,
05                                         Integer>();
06 Xint x = new Xint(solution);
07 for (int i = 0; i < numberVariables_; i++) {
08     if (typ[i] == 0) { // Sicherheitszeit-Gen (SZ-Gen)
09         szInTagen.put(paZuGen.get(i), x.getValue(i));
10    } else { // Sicherheitsbestands-Gen (SB-Gen)
11        if (x.getValue(i) == -1)
12            sbAbbau.add(paZuGen.get(i));
13        else if (x.getValue(i) > 0)
14            sbAufbau.put(paZuGen.get(i), x.getValue(i));
15    }
16 }
17 css.updatePlanauftragWrapper(szenario.getKundenauftraege(), sbAufbau,
18                               sbAbbau, szInTagen);

```

Quelltext 6.2: Transition von Genotyp zu Phänotyp durch Anpassung des Szenarios

²⁸³ Vgl. 5.1.3.1.

²⁸⁴ Die *evaluateConstraints()* ist optional und wird aufgrund der in diesem Fall verwendeten Zielwertbestimmung bei ungültigen Restriktionen nicht benötigt.

Diese Werte werden mit den Ausgangswerten zum Planungszeitpunkt initialisiert. Zusätzlich existiert für jeden Planauftrag ein Objekt der Klasse *PlanauftragWrapper*, das den ursprünglichen Planauftrag einkapselt. Wie in Quelltext 6.2 dargestellt, werden die *PlanauftragWrapper* anhand der Geninformationen der zu evaluierenden Lösung modifiziert und erhalten so Sicherheitsbestandsinformationen sowie veränderte Termine durch Sicherheitszeiten.

Wenn die Lösung im *CurrentSolutionStatus*-Objekt abgebildet ist, erfolgt die Prüfung und Reparatur der logischen Nebenbedingungen nach dem in Kapitel 5.1.3.3 beschriebenen Vorgehen. Quelltext 6.3 zeigt einen Ausschnitt der Überprüfungen. Dabei wird bei jedem Aufruf einer Restriktionsprüfung der boolesche Parameter *repair* übergeben. Ist der Wert des Parameters wahr, so werden innerhalb der Überprüfungsmethoden bei Verletzungen der jeweiligen Restriktion Reparaturmaßnahmen angewendet. Auf diese wird im nachfolgenden Unterkapitel gesondert eingegangen. Ist eine Lösung ungültig und der Parameter *repair* deaktiviert oder eine Reparatur nicht möglich, wird für jedes Ziel der Lösung ein schlechter Zielwert gesetzt. Da im *jMetal*-Framework alle implementierten Algorithmen minimierend arbeiten, entsprechen die Ziele an dieser Stelle der erwarteten Lieferuntreue. Zur Beschleunigung der Laufzeit wird anschließend die *evaluate()*-Methode sofort mittels *return* verlassen. In Zeile 24 wird bei einer Reparatur der Bilanz bei der ein Sicherheitsbestandsabbau entfernt wurde erneut die Frozen Zone Restriktion ohne Reparaturverfahren geprüft.

```

01 solution.setNumberOfViolatedConstraint = 1;
02 // 1.1 SB-Abbau
03 if(isValidAbbau(x, parameter.isRepair()) == false) {
04     for(int i = 0; i<numberOfObjectives_; i++)
05         solution.setObjective(i, 102.0);
06     css.reset();
07     return;
08 }
09 // 1.2 Verletzung der FZ durch SZ
10 if(isValidFrozenZone(x, parameter.isRepair()) == false) {
11     for(int i = 0; i<numberOfObjectives_; i++)
12         solution.setObjective(i, 102.0);
13     css.reset();
14     return;
15 }
16 // 1.3 Verletzung der Bilanz bei SB
17 if(isValidBilanz(x, parameter.isRepair()) == false) {
18     for(int i = 0; i<numberOfObjectives_; i++)
19         solution.setObjective(i, 102.0);
20     css.reset();
21     return;
22 }
23 // 1.4 Erneute FZ Prüfung bei Reparatur von Abbauauftrag in Bilanz
24 if(bilanzRepairedAbbau == true) {
25     if(!isValidFrozenZone(x, false)) {
26         for(int i = 0; i<numberOfObjectives_; i++)

```

```

27     solution.setObjective(i, 102.0);
28     css.reset();
29     return;
30 }
31 }
32 solution.setNumberofViolatedConstraint = 0;
33 if(repairOccured == true)
34     updateGenes(x, css);

```

Quelltext 6.3: Prüfung und Reparatur der Logiknebenbedingungen

Im Anschluss an eine erfolgreiche Prüfung der Logikrestriktionen erfolgt die Validierung der Kapitalbindungsrestriktion. Wird diese verletzt, werden der Lösung ebenfalls schlechte Zielwerte zugeordnet. Ist das übergebene *Solution*-Objekt bezüglich aller Restriktionen gültig, so wird die erwartete Liefertreue der Aufträge durch die Klasse *MRPSim* mittels Simulation berechnet und für die Bewertung der Ziele genutzt.

```

01 double[] kap = getKapitalbindung(css);
02 if(kap[0] != 0.0){ // Höhe der Überschreitungen in kap[0] = Ungültig
03     for(int i = 0; i<numberofObjectives_; i++)
04         solution.setObjective(i, 101.0);
05     css.reset();
06     return;
07 } else { // Gültig = Simulation
08     HashMap<Kundenauftrag, Double> ltsim = simulation.evaluate(css);
09     for(Kundenauftrag ka : szenario.getKundenauftraege()){
10         double liefertreueKa = ltsim.get(ka);
11         solution.setObjective(szenario.getKundenauftraege().indexOf(
12             ka), 100.0-liefertreueKa);
13     }
14     css.reset();
15 }

```

Quelltext 6.4: Prüfung der Kapitalbindung und Simulation

Nach der Festlegung der Zielfunktionswerte werden zur Vorbereitung des nächsten Evaluationsaufrufs die veränderten Werte in den Klassen *CurrentSolutionStatus*, *LagerStatus* und *PlanauftragWrapper* durch die *reset()*-Methode auf die jeweiligen Initialwerte zurückgesetzt. Dies dient der Beschleunigung der Berechnungen bei vielen Evaluationen, da eine komplette Neuinitialisierung der Objekte bei jeder Bewertung zeitintensiver ist als das Zurücksetzen der enthaltenen Werte.

6.2.1.3 Reparatur der Restriktionsverletzungen

Ein Ausschnitt der Implementierung des Reparaturverfahrens für den mehrfachen Sicherheitsbestandsabbau ist in Quelltext 6.5 dargestellt. In der äußeren Schleife wird über die zufällig sortierte Menge der ursprünglich abbauenden *PlanauftragWrapper* iteriert. Für jeden Planauftrag werden Nachfolger, die ebenfalls Sicherheitsbestand abbauen, zur

Menge *verletzendePlanauftraege* hinzugefügt. Enthält diese mehr als ein Element, so ist die Restriktion verletzt und es wird ein zufälliger Auftrag ausgewählt, der weiterhin Sicherheitsbestand abbaut. Für alle *PlanauftragWrapper* der anderen Aufträge wird der Abbau deaktiviert.

```

01 for (PlanauftragWrapper abbauenderPW : sbAbbauAuftraege) {
02     if (!abbauenderPW.isIstAbbauAuftrag())
03         continue;
04     ArrayList<PlanauftragWrapper> verletzendePlanauftraege = new
05             ArrayList<PlanauftragWrapper>();
06     verletzendePlanauftraege.add(abbauenderPW);
07     for (PlanauftragWrapper pwnach : abbauenderPW.getNachfolger()) {
08         if (pwnach.isIstAbbauAuftrag())
09             verletzendePlanauftraege.add(pwnach);
10
11         if (verletzendePlanauftraege.size() > 1) {
12             int stay = PseudoRandom.randInt(0,
13                 verletzendePlanauftraege.size()-1);
14             verletzendePlanauftraege.remove(stay);
15             for (PlanauftragWrapper verl : verletzendePlanauftraege) {
16                 verl.setIstAbbauAuftrag(false);
17             }
18         }
19     }

```

Quelltext 6.5: Implementierung des Reparaturverfahrens für den Sicherheitsbestandsabbau

Quelltext 6.6 enthält den Kernablauf der Reparatur für Verletzungen der Frozen Zone. Dabei wird für jeden *PlanauftragWrapper* in unsortierter Reihenfolge geprüft ob dessen Eckstarttermin vor der Frozen Zone liegt und der Planauftrag ausgeführt wird. Trifft beides zu, werden alle Nachfolger-Planaufträge, die ebenfalls eine Sicherheitszeit enthalten, zur Liste *reduzierbarePW* hinzugefügt. Aus dieser Liste wird sukzessive ein zufälliger Planauftrag ausgewählt, dessen Sicherheitszeit um einen zufälligen Betrag reduziert wird. Dies wird durchgeführt, bis die Frozen Zone nicht mehr verletzt wird.

```

01 for (PlanauftragWrapper pw : getWrapperOhneVorgaenger()) {
02     if (!pw.isNichtAusgefuehrt() && pw.getEckStarttermin().before(
03                     parameter.getFrozenZone())) {
04         // Frozen Zone verletzt
05         ArrayList<PlanauftragWrapper> reduzierbarePW = new ArrayList<
06                                         PlanauftragWrapper>();
07         if (pw.getSicherheitszeit() > 0)
08             reduzierbarePW.add(pw);
09         for (PlanauftragWrapper nachfolger : pw.getNachfolger())
10             if (!nachfolger.isNichtAusgefuehrt() && nachfolger.
11                 getSicherheitszeit() > 0)
12                 reduzierbarePW.add(nachfolger);
13
14         int verletzung = tageVerletzungFrozenZone(pw);
15         while (verletzung > 0) {
16             int zuReduzierenderPA = PseudoRandom.nextInt(0,
17                                         reduzierbarePW.size()-1);
18             PlanauftragWrapper redPW = reduzierbarePW.get(
19                 zuReduzierenderPA);
20             if (redPW.getSicherheitszeit() > 0) {
21                 int zuReduzierendeZeit = PseudoRandom.nextInt(1, redPW.
22                                         getSicherheitszeit());
23                 redPW.setSicherheitszeit((redPW.getSicherheitszeit() -
24                                         zuReduzierendeZeit));
25                 verletzung = verletzung - zuReduzierendeZeit;
26             } else
27                 reduzierbarePW.remove(zuReduzierenderPA);
28         }
29         [...]
30     }
31 }
```

Quelltext 6.6: Implementierung des Reparaturverfahrens für die Frozen Zone

Bei der Reparatur der Sicherheitsbestands-Bilanz können nur Kombinationen aus Material und Lagerort zu einer Verletzung führen, bei denen mindestens ein Abbau-Auftrag enthalten ist. Für jede dieser Kombinationen wird die Funktion aus Quelltext 6.7 aufgerufen²⁸⁵. Alle Planaufträge, die den Sicherheitsbestand für das Material m im Lagerort l beeinflussen können, werden nach ihrer zeitlichen Ereignisreihenfolge hinsichtlich Sicherheitsbestandsaufbau und Sicherheitsbestandsabbau sortiert. Nach der Initialisierung der Bilanz mit dem Ausgangsbestand im Lager werden nacheinander die Mengen der Planaufträge addiert beziehungsweise subtrahiert. Führt dies zu einer negativen Bilanz erfolgt die Reparatur.

²⁸⁵ Eine voneinander unabhängige Prüfung der Lager-Material-Kombinationen ist an dieser Stelle möglich, da in der aufgerufenen Reparaturfunktion niemals ein zusätzlicher Sicherheitsbestandsabbau gesetzt wird.

```

01 private boolean[] checkAndRepairLagerMatBilanz(Lager l, Material m) {
02     // Aufträgen anhand der Aktionsdaten sortieren
03     ArrayList<PlanauftragWrapper> sbpw = css.getSBPlanauftraege(l, m);
04     Collections.sort(sbpw, new SBWrapperComparator());
05     int bilanzsb = 0;
06     if (l.getInitialeSBGrenze().containsKey(m))
07         bilanzsb = l.getInitialeSBGrenze().get(m);
08
09     for (int i = 0; i < sbpw.size(); i++) {
10         PlanauftragWrapper pw = sbpw.get(i);
11         if (pw.getSbAufbauVorlauf() > 0)
12             bilanzsb += pw.getPlanauftrag().getMenge();
13         else if (pw.isIstAbbauAuftrag())
14             bilanzsb -= pw.getPlanauftrag().getMenge();
15
16         if (bilanzsb < 0) {
17             // Prüfung ob ausreichend Potenzial für vorherigen
18             // Aufbau vorhanden ist
19             ArrayList<PlanauftragWrapper> aufbauPotenzial =
20                 getPotentielleAufbauPA(sbpw, pw);
21             int aufbauMenge = 0;
22             for (PlanauftragWrapper a : aufbauPotenzial)
23                 aufbauMenge += a.getPlanauftrag().getMenge();
24             // Ausreichend Potenzial = Zufallsauswahl
25             boolean abbauDeaktivieren = true;
26             if ((aufbauMenge + bilanzsb) >= 0)
27                 abbauDeaktivieren = false;
28             if (abbauDeaktivieren) {
29                 pw.setIstAbbauAuftrag(false);
30                 bilanzsb += pw.getPlanauftrag().getMenge();
31                 bilanzRepairedAbbau = true
32             } else {
33                 Collections.shuffle(aufbauPotenzial);
34                 for (PlanauftragWrapper aufbauPw : aufbauPotenzial) {
35                     int minVorlauf = getMinimalBenoetigtenVorlauf(pw,
36                                         aufbauPw)
37                     int neuerVorlauf = PseudoRandom.nextInt(minVorlauf,
38                                         parameter.getMaxTageVorlaufSB());
39                     aufbauPw.setSbAufbauVorlauf(neuerVorlauf);
40                     bilanzsb += aufbauPw.getPlanauftrag().getMenge();
41                     if (bilanzsb >= 0)
42                         break;
43                 }
44             i = -1; // Schleife neu starten
45             Collections.sort(sbpw, new SBWrapperComparator());
46             bilanzsb = 0;
47             if (l.getInitialeSBGrenze().containsKey(m))
48                 bilanzsb = l.getInitialeSBGrenze().get(m);
49         }
50     }
51 }
52 [...]
53 }
54 }
```

Quelltext 6.7: Implementierung des Reparaturverfahrens für die Sicherheitsbestands-

Bilanz

Dazu wird geprüft, ob durch den vorherigen Aufbau von Sicherheitsbestand durch andere Planaufträge die Bilanzverletzung vermieden werden kann. Ist das nicht möglich, wird der Sicherheitsbestandsabbau deaktiviert. Ist ausreichend Potenzial vorhanden, wird eine zufällige Auswahl hinsichtlich der durchzuführenden Aktion getroffen. Statt der Deaktivierung des Abbaus kann dann auch der vorherige Aufbau von Sicherheitsbestand erfolgen. Dazu wird solange in zufälliger Reihenfolge durch die potentiellen Aufbau-Aufträge iteriert und ein Sicherheitsbestandsaufbau durchgeführt, bis die Bilanz nicht mehr negativ ist. Im Anschluss muss die Überprüfungsschleife neu gestartet werden, da sich die Sortierreihenfolge der *PlanauftragWrapper* grundlegend geändert haben kann.

Bei jedem Verfahren erfolgt die initiale Reparatur nur auf der phänotypischen Repräsentation der Lösung. Anschließend werden alle *PlanauftragWrapper* noch ein weiteres Mal aktualisiert um eine korrekte Anpassung an die veränderten Termine und Ausführungs-informationen zu gewährleisten. Die Anpassung der Gene im *Solution*-Objekt erfolgt erst nach einer erfolgreichen Reparatur.

6.2.2 Auswahl und Modifikation der Operatoren

6.2.2.1 Selektion: Binary-Tournament-Selektion

Der Binary-Tournament-Operator zählt aufgrund seiner Effizienz zu den am häufigsten verwendeten Selektionsoperatoren und wird deswegen auch in dieser Implementierung eingesetzt²⁸⁶. Der Operator wählt zwei zufällige Individuen aus der Population aus und vergleicht diese miteinander. Hauptkriterium ist die Pareto-Dominanz. Als zweites Kriterium bei fehlender Dominanz wird der Abstand zu anderen Lösungen in der Population, die sogenannte Crowding Distance, herangezogen.

Wie in Quelltext 6.8 ersichtlich, wird zuerst die Dominanz geprüft. Dadurch werden aufgrund der im Problem vorgegebenen Zieldefinition gültige Lösungen hinsichtlich der Restriktionen immer ungültigen Lösungen vorgezogen. Zwischen zwei ungültigen Lösungen werden Lösungen mit Kapitalbindungsverletzungen vor Lösungen mit logischen Restriktionsverletzungen bevorzugt. Kann durch die Dominanz kein eindeutiger Sieger ermittelt werden, wird geprüft, welche Lösung eine bessere Crowding Distance aufweist und schlussendlich erfolgt eine Zufallsauswahl.

²⁸⁶ Siehe [CLV07], S. 25.

```

01 public Object execute(Object object) {
02     [...]
03     int flag = dominance_.compare(solution1,solution2);
04     if (flag == -1)
05         return solution1;
06     else if (flag == 1)
07         return solution2;
08     else if (solution1.getCrowdingDistance() > solution2.
09             getCrowdingDistance())
10        return solution1;
11    else if (solution2.getCrowdingDistance() > solution1.
12             getCrowdingDistance())
13        return solution2;
14    else if (PseudoRandom.randDouble()<0.5)
15        return solution1;
16    else
17        return solution2;
18 }
```

Quelltext 6.8: Binary-Tournament-Selektion

6.2.2.2 Crossover: Restricted-Single-Point-Crossover

Der Single-Point-Crossover ist für die vorliegende genetische Repräsentation als Crossover-Operator geeignet. Dabei wird, wie in Abbildung 6.3 dargestellt, ein zufälliger Punkt zwischen zwei Genen ausgewählt, um aus zwei Lösungen durch die Rekombination der davor und dahinter liegenden Gene zwei Nachfolger zu bilden²⁸⁷.

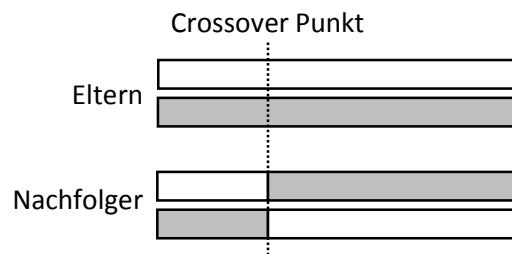


Abbildung 6.3: Single-Point-Crossover

Aufgrund der Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Genen durch die Restriktionen kann diese Art des Crossovers jedoch zu weiteren Restriktionsverletzungen führen. In Quelltext 6.9 wird deswegen der Single-Point-Crossover um die im vorherigen Kapitel vorgeschlagene Strategie der Begrenzung der Crossover-Punkte umgesetzt. Wird diese Strategie verwendet, so ist der Parameter *crossoverRestricted* ∈ {falsch, wahr} wahr und der Crossover-Punkt wird aus den in der Variable *validPoints* enthaltenen Punkten

²⁸⁷ Siehe [Talb09], S. 214 f.

gewählt. Diese werden bei der Initialisierung durch das *SBSZProblem*-Objekt entsprechend der Grenzen zwischen den Kundenaufträgen generiert.

```

01 public Solution[] doCrossover(Solution parent1, Solution parent2) {
02     Solution[] offSpring = new Solution[2];
03     [...]
04     if (PseudoRandom.randDouble() < crossoverProbability) {
05         int crossoverPoint = 0;
06         if (crossoverRestricted) { // Nur an KA Grenzen
07             int crossoverPointNumber = PseudoRandom.randInt(0,
08                     validPoints.length - 1);
09             crossoverPoint = validPoints[crossoverPointNumber];
10         } else // Klassischer Single Point
11             crossoverPoint = PseudoRandom.randInt(0, parent1.
12                                         numberOfVariables() - 1);
13         [...]
14     }
15     return offSpring;
16 }
```

Quelltext 6.9: Restricted-Single-Point-Crossover

6.2.2.3 Mutation: Restricted-Bit-Flip-Mutation

Ein häufig im Umfeld von Integer-Kodierungen anzutreffender Operator ist die Bit-Flip-Mutation. Dabei wird jedes Gen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit mutiert, indem ein neuer, zufälliger Wert zwischen der erlaubten Unter- und Obergrenze gewählt wird.

Aufgrund der gewählten Repräsentation würde eine gleichmäßige Verteilung bei der Wahl des neuen Wertes vorwiegend zu einem Aufbau von Sicherheitsbeständen und -zeiten führen. Um dem entgegenzuwirken, wird der Bit-Flip Mutator so modifiziert, dass die Einsatzchance von Sicherheitsbeständen und -zeiten, die einem Genwert größer null entspricht, begrenzt wird. Dazu werden, wie in Quelltext 6.10 ersichtlich, die Parameter *mutationRestricted* ∈ {falsch, wahr} und *sbszIntensity* ∈ [0.0,1.0] eingeführt. Ist *mutationRestricted* wahr, so wird mit der Wahrscheinlichkeit von *sbszIntensity* ein positiver Wert für das Gen gewählt, ansonsten ein Wert zwischen der unteren Grenze bis null²⁸⁸.

²⁸⁸ Für Sicherheitsbestands-Gene kann so auch ein Abbau-Wert gesetzt werden. Interdependenzen zwischen dem Sicherheitsbestands- und Sicherheitszeit-Gen eines Planauftrags werden an dieser Stelle nicht gesondert aufgelöst, sondern in der Interpretation des Phänotyps berücksichtigt. Der gleichzeitige Einsatz einer Sicherheitszeit und der Aufbau von Sicherheitsbestand sind möglich. Entspricht der Genwert für den Sicherheitsbestand jedoch -1, also einem Abbau, so wird die Sicherheitszeit ignoriert.

```

01 public void doMutation(Solution solution) {
02     Xint x = new Xint(solution);
03     for (int i = 0; i < solution.numberOfVariables(); i++) {
04         if (PseudoRandom.randDouble() < mutationProbability) {
05             int value;
06             if (mutationRestricted) { // Eingeschränkte Mutation
07                 if (PseudoRandom.randDouble() < sbszIntensity)
08                     value = PseudoRandom.randInt(Math.min(1, x.
09                                         getUpperBound(i)), x.getUpperBound(i));
10             else
11                 value = PseudoRandom.randInt(x.getLowerBound(i), 0);
12         } else { // Klassische BitFlip
13             value = PseudoRandom.randInt(x.getLowerBound(i), x.
14                                         getUpperBound(i));
15         }
16         x.setValue(i, value);
17     }
18 }
19 }
```

Quelltext 6.10: Restricted-Bit-Flip-Mutation

Die Einsatzintensität kann optional während der Laufzeit dynamisch angepasst werden. Die dazu erforderlichen Einstellungen werden im folgenden Unterkapitel beschrieben.

6.2.3 Auswahl und Modifikation des Lösungsalgorithmus

Da im Bereich der genetischen Algorithmen der SPEA2-Algorithmus zu den State-of-the-Art-Verfahren zählt und in vielen vergleichenden Publikationen hinsichtlich der Effizienz bezüglich Lösungsgüte und Berechnungszeit führend ist, wird dieser für die Implementierung verwendet²⁸⁹. Durch die generische Implementierung des Problems kann der SPEA2-Algorithmus später durch neu entwickelte Algorithmen ersetzt werden. Die vorgenommenen Modifikationen lassen sich aufgrund der gleichen Vorgehensweise des genetischen Ablaufs ebenfalls auf neue Algorithmen übertragen.

Zuerst wurde die Standardimplementierung des SPEA2 modifiziert, um die Qualität der Ursprungspopulation durch die Generierung von gültigen Lösungen zu steigern. Dazu wurde die ursprüngliche Initialisierung um ein Verfahren ergänzt, das so lange neue Lösungen initialisiert, bis die Ausgangspopulation einen ausreichenden Anteil an gültigen Lösungen enthält. Dieser Anteil wird, wie in Quelltext 6.11 ersichtlich, durch den Parameter *initValidPercentage* $\in [0.0, 1.0]$ bestimmt.

²⁸⁹ Alternativ hätte auch der NSGA-II Algorithmus verwendet werden können, der SPEA2 Algorithmus bietet jedoch nativ den Vorteil eines mitgeführten Elitearchivs der besten Lösungen.

Zusätzlich wurde die Methode `createVariables()` der *jMetal*-Klasse `ArrayIntSolutionType` so verändert, dass ein Gen nur noch mit der Wahrscheinlichkeit $initSBSZIntensity \in [0.0,1.0]$ mit einem Wert größer Null initialisiert wird. Dies ermöglicht eine genauere Steuerung der initialen Kapitalbindung.

```

01 if(initValidPercentage == 0.0) { // Normale Initialisierung
02     for (int i = 0; i < populationSize; i++) {
03         newSolution = new Solution(problem_);
04         problem_.evaluate(newSolution);
05         solutionSet.add(newSolution);
06     }
07 } else { // Gültige Initialisierung
08     int neededValid = ((double)populationSize * initValidPercentage);
09     int neededInvalid = populationSize-neededValid;
10     int currentInvalid = 0;
11
12     while(nrOfInitialCorrect < neededValid && solutionSet.size() <
13           populationSize) {
14         newSolution = new Solution(problem_);
15         problem_.evaluate(newSolution);
16         if(newSolution.getObjective(0) <= 100.0) {
17             nrOfInitialCorrect++;
18             solutionSet.add(newSolution);
19         } else if(currentInvalid < neededInvalid) {
20             solutionSet.add(newSolution);
21             currentInvalid++;
22         }
22     }
23 }
```

Quelltext 6.11: Zufallsinitialisierung von gültigen Lösungen

Als zweite Modifikation wurde eine dynamische Anpassung des *sbszIntensity*-Parameters innerhalb der Restricted-Bit-Flip-Mutation integriert. Dazu wird analog zur Prüfung der Validität im vorherigen Quelltext die Gültigkeit der Lösungen in einer Generation anhand ihrer Zielwerte ermittelt. Werden über mehrere Generationen von Nachfolgepopulationen überwiegend gültige Lösungen generiert, so wird der Parameter *sbszIntensity* innerhalb der Grenzen erhöht, wodurch eine schnellere Ausnutzung der Kapitalbindungsgrenze erreicht werden kann. Werden jedoch zu viele ungültige Lösungen gefunden, wird die Intensität reduziert und bei ausgeglichenen Verhältnissen bleibt der Parameter konstant²⁹⁰.

²⁹⁰ Dabei wird eine Generation als gültig definiert, wenn mehr als 25% gültige Lösungen generiert worden sind. Respektive ist eine Generation ungültig, wenn mehr als 25% ungültige Lösungen generiert worden sind.

6.3 Implementierung der MRP-Ablaufsimulation

Die implementierte Simulationsumgebung setzt auf ein bereits erprobtes Simulations-Grundgerüst auf. Ergänzend dazu wurden die Verwaltung der Simulations- und Statistikvariablen sowie die Umsetzung der Eventhandler programmiert.

6.3.1 Basiskomponenten aus d³fact

Um häufig auftretende Fehler bei der Umsetzung von Simulationsprojekten zu vermeiden, wird auf vorhandene Komponenten der Simulationsumgebung d³fact²⁹¹ zurückgegriffen. D³fact ist eine diskrete, eventbasierte Simulationssoftware, die durch die Lehrstühle Wirtschaftsinformatik 3 und Algorithmen und Komplexität an der Universität Paderborn entwickelt und getestet wurde.

Zur Steigerung der Evaluierungsgeschwindigkeit wird nur das Scheduling-Grundmodell der Software genutzt. Dieses arbeitet wie in Abbildung 6.4 dargestellt. Kern ist die Klasse *Scheduler*, die für die Verwaltung der Events zuständig ist. Dabei ist ein *Scheduler* Objekt für die Simulationsuhr und die Ereignisliste zuständig und folgt dem in Abbildung 3.10 dargestellten Ablauf. Events werden durch die Klasse *Event* repräsentiert, die die notwendigen Informationen in den Variablen *data*, *source* und *type* vorhält. Die Variable *type* repräsentiert in dieser Umsetzung die in Tabelle 5.3 vorgestellten Ereignisarten.

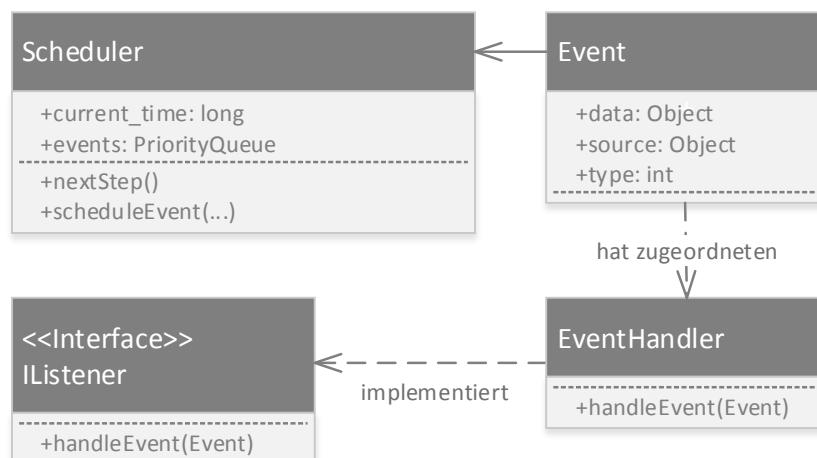


Abbildung 6.4: d³fact Scheduling-Komponenten

²⁹¹ Siehe [DML04], [DAL+05] und <http://www.d3fact.de>.

Jedem Event wird ein zugehöriger *EventHandler* zugeordnet, der die Ereignisroutine enthält. *EventHandler* müssen dazu das Interface *Ilistener* implementieren. Durch Aufruf der Methode *nextStep()* wird das jeweils nächste zu evaluierende Ereignis aus der Ereignisliste entnommen und dem passenden *EventHandler* übergeben, der die zugehörige Ereignisroutine ausführt.

6.3.2 Ablaufsteuerung MRPSim

Die übergeordnete Ablaufsteuerung aus Abbildung 5.7 wird durch die Klasse *MRPSim* durchgeführt. Diese stellt dazu die Funktion *evaluate()* bereit, die in Quelltext 6.12 beschrieben wird. Zunächst werden die initialen Events bestimmt und die AusgabevARIABLE der Liefertreuewerte wird initialisiert. Anschließend erfolgt eine Schleife über die vorgegebene Anzahl von Simulationsläufen, die durch die Klasse *SBSZParameter* definiert werden. Jeder individuelle Durchlauf wird über die Methode *singleSimRun()* angestoßen. Im Anschluss an einen solchen Durchlauf werden dessen Statistikvariablen ausgewertet und nach Formel (3.15) der Erwartungswert durch die Berechnung des Mittelwerts der bisherigen Simulationsläufe gebildet. Abschließend werden die Ereignisliste sowie die Zustands- und Statistikvariablen durch die Funktion *resetSim()* auf den Ausgangszustand zurückgesetzt. Die Start- und Endtermine sowie Sicherheitsbestandsauf- und Abbauinformationen bleiben in den *PlanauftragWrapper*-Objekten jedoch erhalten.

```

01 public HashMap<Kundenauftrag, Double> evaluate(HashMap<Planauftrag,
02 Integer> sbZugaenge, Xint x) {
03     HashMap<Kundenauftrag, Double> liefertreue
04         = new HashMap<Kundenauftrag, Double>();
05     HashMap<Integer, ArrayList<Event>> initEvents
06         = erstelleInitialeEvents(sbZugaenge);
07     [...]
08     for(int i = 0; i < anzahlEvaluationen; i++) {
09         singleSimRun();
10         liefertreue = this.evaluiereLiefertreue();
11         css.resetSim();
12     }
13     [...]
14     return liefertreue;
15 }
```

Quelltext 6.12: Übergeordnete Ablaufsteuerung

Die Methode *singleSimRun()* arbeitet wie in Quelltext 6.13 gezeigt. Zuerst werden die initialen Events an den *Scheduler* zur Einplanung übergeben. Solange noch Events in der Ereignisliste des *Schedulers* enthalten sind, wird die Simulation durch Aufruf der Me-

thode *nextStep()* fortgesetzt. In dieser Methode wird anhand der zuvor definierten Reihenfolgeregelung das nächste Ereignis ermittelt und zur Bearbeitung an den zugehörigen Eventhandler weitergegeben.

```

01 public void singleSimRun() {
02     scheduleInitialEvents(initEvents);
03     while(simScheduler.currentTime() <= maxtime && simScheduler.
04                                     eventCount() > 0) {
05         simScheduler.nextStep();
06     }
07 }
```

Quelltext 6.13: Individueller Simulationslauf

6.3.3 Simulations- und Statistikvariablen

Die in Abschnitt 5.1.4.2 definierten Zustandsvariablen h_{ml} und h_{ml}^{sb} , die für die Höhe des aktuell disponiblen Lagerbestands und die Höhe der Sicherheitsbestandsgrenze eines Materials m in einem Lager l stehen, werden ebenso wie die Warteschlangen W_{ml} in der Klasse *LagerStatus* definiert. Als zusätzliche Hilfsvariable ist in der Klasse *PlanauftragWrapper* noch der Status *bedarfReserviert* hinzugefügt worden, der angibt, ob der entsprechende Bedarf des nachfolgenden Planauftrags schon erfüllt wurde.

Die Statistikvariablen werden in der Klasse *EventLog* durch die Eventroutinen erfasst. Dazu zählt unter anderem der Auslieferverzug in Tagen je Planauftrag und Kundenauftrag.

Der Zugriff erfolgt über die gemeinsame Verwendung des *CurrentSolutionStatus* Objekts mit dem genetischen Algorithmus. Dies bietet den Vorteil, dass durch die Prüfung der Nebenbedingungen viele Objekte, wie beispielsweise die *PlanauftragWrapper*, schon passend modifiziert werden und so eine Beschleunigung der Berechnungen erreicht wird.

6.3.4 Eventhandler

Die Eventroutinen werden in Klassen abgebildet, die das Interface *Ilistener* implementieren und dazu die Methode *handleEvent()* bereitstellen. Zur Zentralisierung oft verwendeter Methoden existiert die abstrakte Klasse *MainListener*, aus der mehrere Unterklassen abgeleitet werden. Die in Abbildung 6.5 gezeigten Unterklassen definieren jeweils eine spezifische Implementierung der *handleEvent()*-Methode.

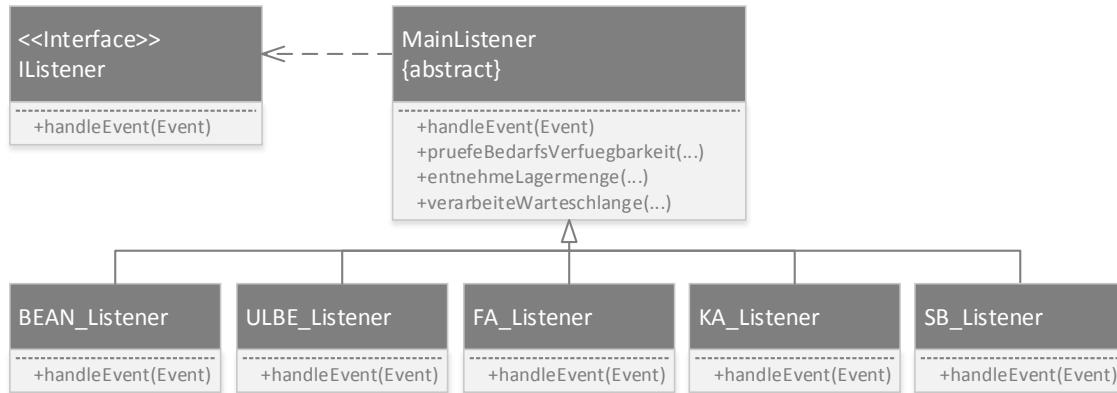


Abbildung 6.5: Klassenstruktur für Eventroutinen

Die durch die Klasse *MainListener* bereitgestellten Funktionen bilden die in Kapitel 5.1.4.4 definierten Hilfsroutinen ab²⁹². Stellvertretend für die anderen Routinen wird nachfolgend die Klasse *FAHandler* beschrieben. Diese wird den Start- und Endereignissen eines Fertigungsauftrags als *EventHandler* zugeordnet.

Das Ereignis *EV_FA_A* wird zum ersten Mal zum regulären – unter Berücksichtigung von Sicherheitszeiten – geplanten Starttermin des jeweiligen Fertigungsauftrags eingeplant. In Quelltext 6.14 wird die in Abbildung 5.12 definierte Ereignisroutine umgesetzt. Dabei wird zur Vereinfachung der Berechnungen die Simulationsvariable *bedarfReserviert* genutzt, um bei mehreren Vorgänger-Planaufträgen den Status der jeweiligen Bedarfe nachvollziehen zu können.

```

01 if(e.type() == Event.EV_FA_A) {
02     PlanauftragWrapper pw = e.getSource();
03     boolean alleBedarfeErfuellt = true;
04     // Jeden Vorgänger (FA Bedarf) prüfen & entnehmen wenn möglich
05     for(PlanauftragWrapper pw_vor : pw.getVorgaenger()) {
06         if(!pw_vor.isBedarfReserviert()) {
07             if(pruefeBedarfsVerfuegbarkeit(pw_vor, e)) {
08                 entnehmeLagermenge(pw_vor, e);
09                 pw_vor.setBedarfReserviert(true);
10             }
11         } else {
12             alleBedarfeErfuellt = false;
13             if(e.getScheduledTimes() == 0)
14                 css.getLagerStatus(pw_vor.getPlanauftrag().getLager_ziel(
15                     ).addWarteschlange(e, pw_vor.
16                     getPlanauftrag().getMaterial()));
17         }
18     }
19 }
20 // Wenn alle Bedarfe erfüllt: Endeevent erstellen
21 if(alleBedarfeErfuellt) {
  
```

²⁹² Dabei wurde zur Vereinfachung die Routine *entnehmeLagermenge()* um die Entfernung des aufrufenden Events aus der zugehörigen Warteschlange ergänzt.

```

22     int abweichung = szenario.getMatVerteilungen().
23         getLieferterminAbweichung(pw.getPlanauftrag()).
24         getMaterial(), pw.getPlanauftrag().getLager_ziel()
25         .getWerk());
26     int neuerEckendtermin = (int)scheduler.currentTime() + pw.
27         getPlanauftrag().getDauerInTagen() +
28         abweichung;
29     scheduler.scheduleEventAbsolut(this, new Event(e, Event.EV_FA_E, pw)
30                                     , neuerEckendtermin);
31 }
32 e.incrementScheduledTimes();
33 }
```

Quelltext 6.14: Ereignisroutine für den Start eines Fertigungsauftrags

Können nicht alle Bedarfe erfüllt werden, wird das Ereignis in die entsprechenden Warteschlangen eingereiht. Ansonsten wird das Endereignis *EV_FA_E* unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Terminabweichung eingeplant. Dessen Eventroutine wird in Quelltext 6.15 dargestellt.

```

01 if(e.type() == Event.EV_FA_E) {
02     // Ziel Lagerbestand erhöhen und Warteschlange verarbeiten
03     PlanauftragWrapper pw = e.getData();
04     LagerStatus lagerstatus = css.getLagerStatus(ziellager);
05     Material material = pw.getPlanauftrag().getMaterial();
06     lagerstatus.erhoeheMaterialbestand(material, pw.getPlanauftrag().
07                                         getMenge());
08     this.verarbeiteWarteschlange(material, pw.getPlanauftrag().
09                                     getZiellager());
10
11    // Statistikvariablen updaten
12    int auslieferverzugInTagen = (int)scheduler.currentTime() -
13                                scheduler.dateToSimTime(pw.
14                                getEckendTermin());
15    css.getEventLog().setAuslieferVerzug(pw, auslieferverzugInTagen);
16 }
```

Quelltext 6.15: Ereignisroutine für das Ende eines Fertigungsauftrags

Zum Endzeitpunkt eines Fertigungsauftrags wird der Materialbestand im Ziellager um die Menge des Fertigungsauftrags erhöht und die Warteschlangeverarbeitung des Ziellagers angestoßen. Zusätzlich werden die Statistikvariablen in der Klasse *EventLog* mit dem Auslieferverzug des Fertigungsauftrags aktualisiert.

6.4 Erweiterung des Auswahlinterfaces

Zur Verbindung zwischen dem proaktiven Verfahren und dem Auswahlinterface wird ein Ergebnisobjekt als XML-Datei²⁹³ zwischengespeichert. Dieses enthält das Szenario und eine Liste mit Lösungsobjekten, die jeweils Informationen zu dem Sicherheitsbestands-Verlauf, den Sicherheitszeiten und den erreichten Liefertreue-Werten enthalten. Das Auswahlinterface wurde so erweitert, dass ein Ergebnisobjekt per XML eingelesen werden kann. Dadurch können die Lösungen unabhängig berechnet und erst später ausgewertet werden.

Nach der Auswahl des Ergebnisobjekts wird der überarbeitete Zielwert-Dialog aus Abbildung 6.6 angezeigt. In diesem kann für jeden Kundenauftrag der minimal zu erreichende Liefertreuwert festgelegt werden. Im unteren Bereich kann die Berechnungsart der Goal-Programming-Funktion ausgewählt und die notwendige Vorgabe des Zielwerts durchgeführt werden. Einzelne Aufträge können mittels Checkbox aus der Zielfunktionswertberechnung ausgeschlossen werden.

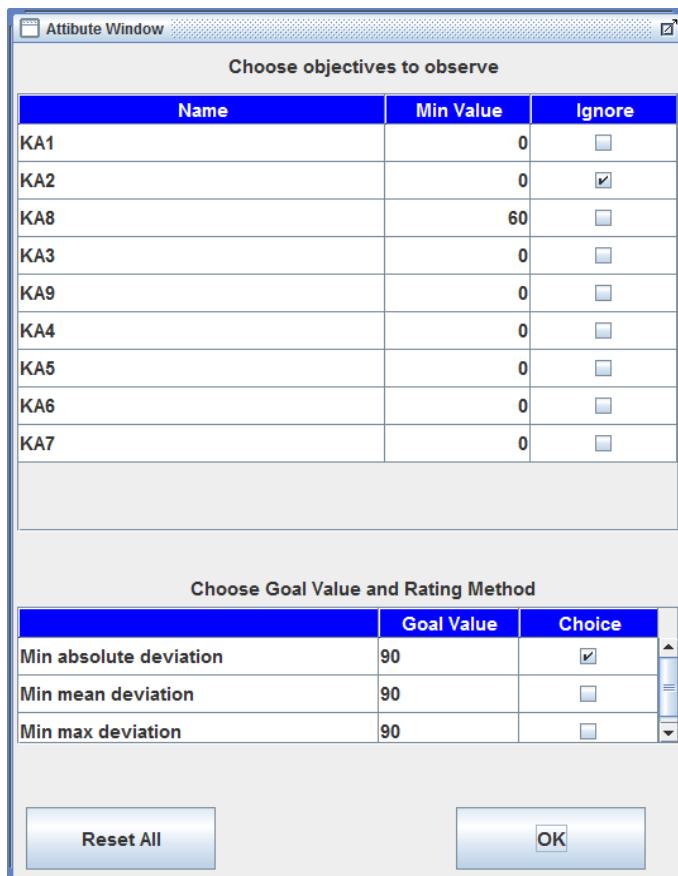


Abbildung 6.6: Zielwert-Dialog

²⁹³ Extended Markup Language. Dazu wird die Bibliothek XStream verwendet.

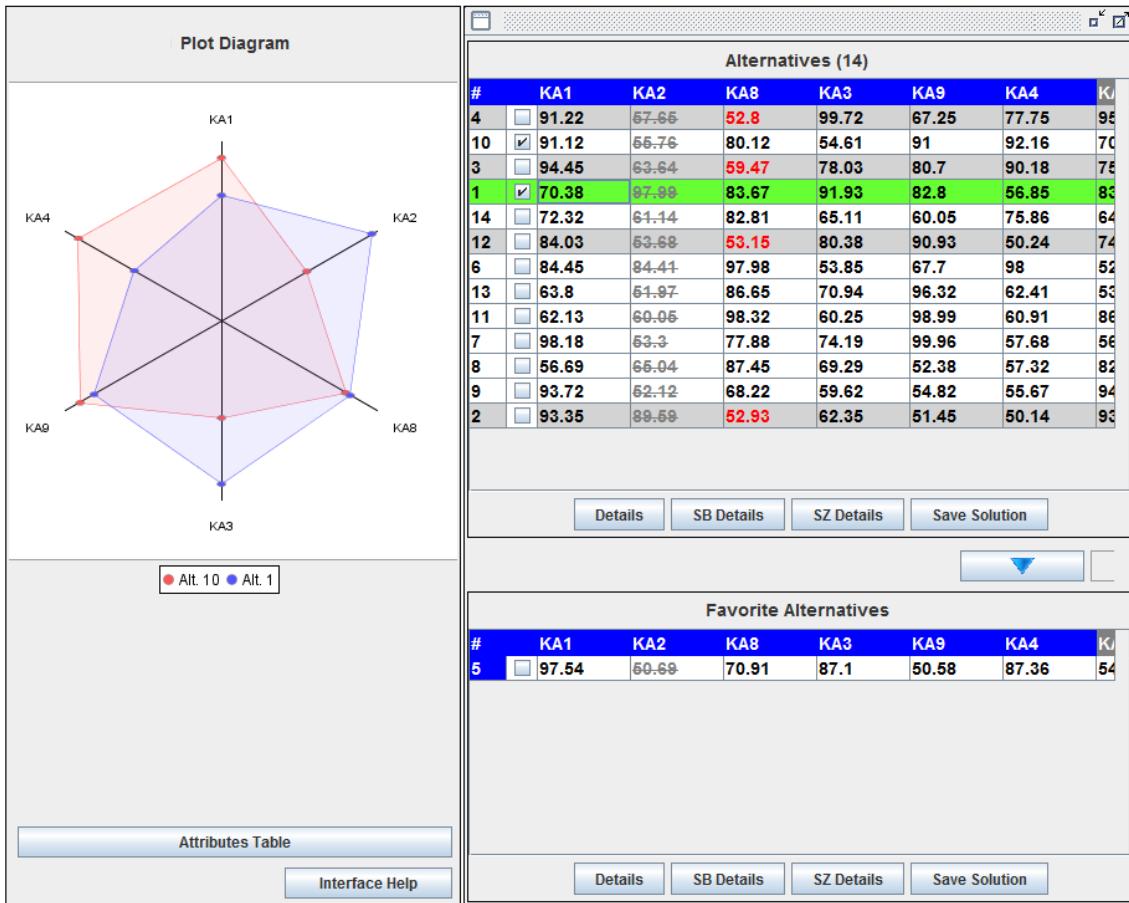


Abbildung 6.7: Auswahl-Interface

Nachdem die Einstellungen bezüglich der Zielwerte durchgeführt worden sind, erscheint das Auswahl-Interface aus Abbildung 6.7, über das sich Lösungen analysieren, vergleichen und präferieren lassen. Im oberen rechten Bereich werden alle Lösungen absteigend nach dem Zielfunktionswert sortiert präsentiert. Dabei werden die Aufträge, für deren Erreichung aufgrund der rollierenden Vorgehensweise mit der aktuellen Auswahl Entscheidungen fixiert werden, in blau in den Tabellenüberschriften hervorgehoben. Lösungen, die nicht die zuvor gesetzten Mindestwerte erreichen, werden mit roter Hervorhebung der unzureichenden Zielwerte und grauer Füllung angezeigt. Die Einstellungen bezüglich der Zielfunktion lassen sich über den Knopf *Attributes Table* erneut anpassen. Das Spinnendiagramm dient wie bisher zum schnellen Vergleich mehrerer Lösungen. Zur besseren Übersicht werden jedoch nur Kundenaufträge aus dem blau hinterlegten Bereich eingezeichnet. Favorisierte Lösungen können zum späteren Vergleich in einen gesonderten Bereich für Favoriten übernommen werden.

Zu jeder Lösung lassen sich über die Knöpfe *SB Details* und *SZ Details* erweiterte Informationen zu den eingesetzten Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten anzeigen.

Die Detailinformationen für Sicherheitszeiten gliedern sich, wie in Abbildung 6.8 ersichtlich, in drei Bereiche. Zuerst wird eine Liste der Materialien mit Sicherheitszeiten eingeblendet, aus der ein Material auswählbar ist, für das rechterhand die Planaufträge mit der Höhe der jeweiligen Sicherheitszeit als Balken aufgetragen werden. Darunter werden zwei Tortendiagramme eingeblendet, die die prozentuale Verteilung der Sicherheitszeiten auf die verschiedenen Materialien und Kundenaufträge anzeigen.

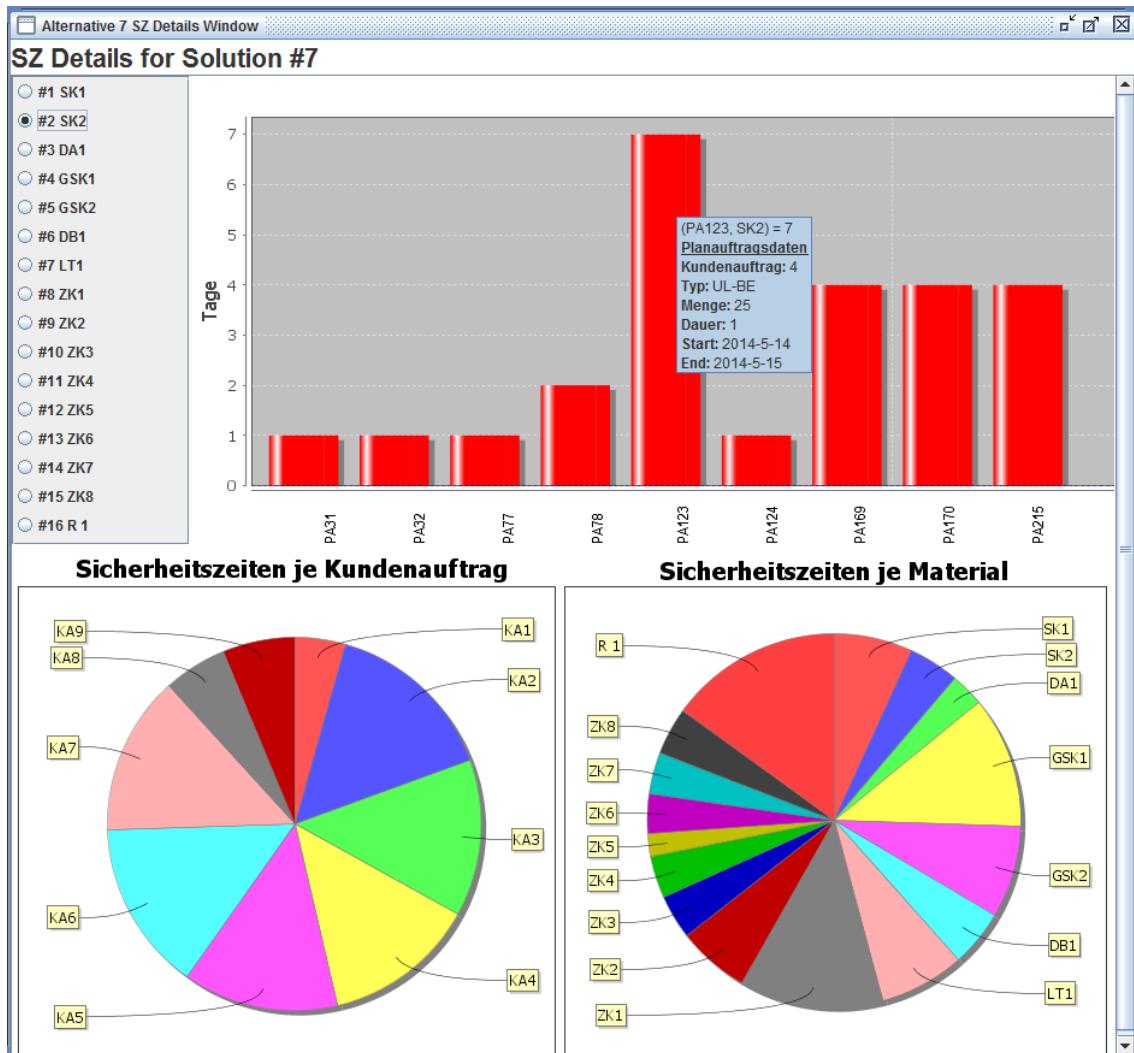


Abbildung 6.8: Detailfenster für Sicherheitszeiten

Die Darstellung für die Sicherheitsbestände entspricht Abbildung 6.9, wobei zuoberst eine Matrix angezeigt wird, die angibt, für welche Materialien in welchen Lagern Sicherheitsbestand existiert. Dies wird durch 1- und 0-Werte gekennzeichnet. Durch Klick auf einen *1er*-Wert wird das darunterliegende Balkendiagramm mit den relativen Änderungen des Sicherheitsbestands aktualisiert²⁹⁴. Über die Checkboxen lassen sich mehrere

²⁹⁴ Für die Diagramme wurde die bereits integrierte Grafikbibliothek *jFreeChart* verwendet.

Materialien auswählen, deren absolute Sicherheitsbestandsverläufe dann im untersten Diagramm eingeblendet werden. Das angezeigte Lager für dieses Diagramm lässt sich per Doppelklick auf die Lagernamen ändern.

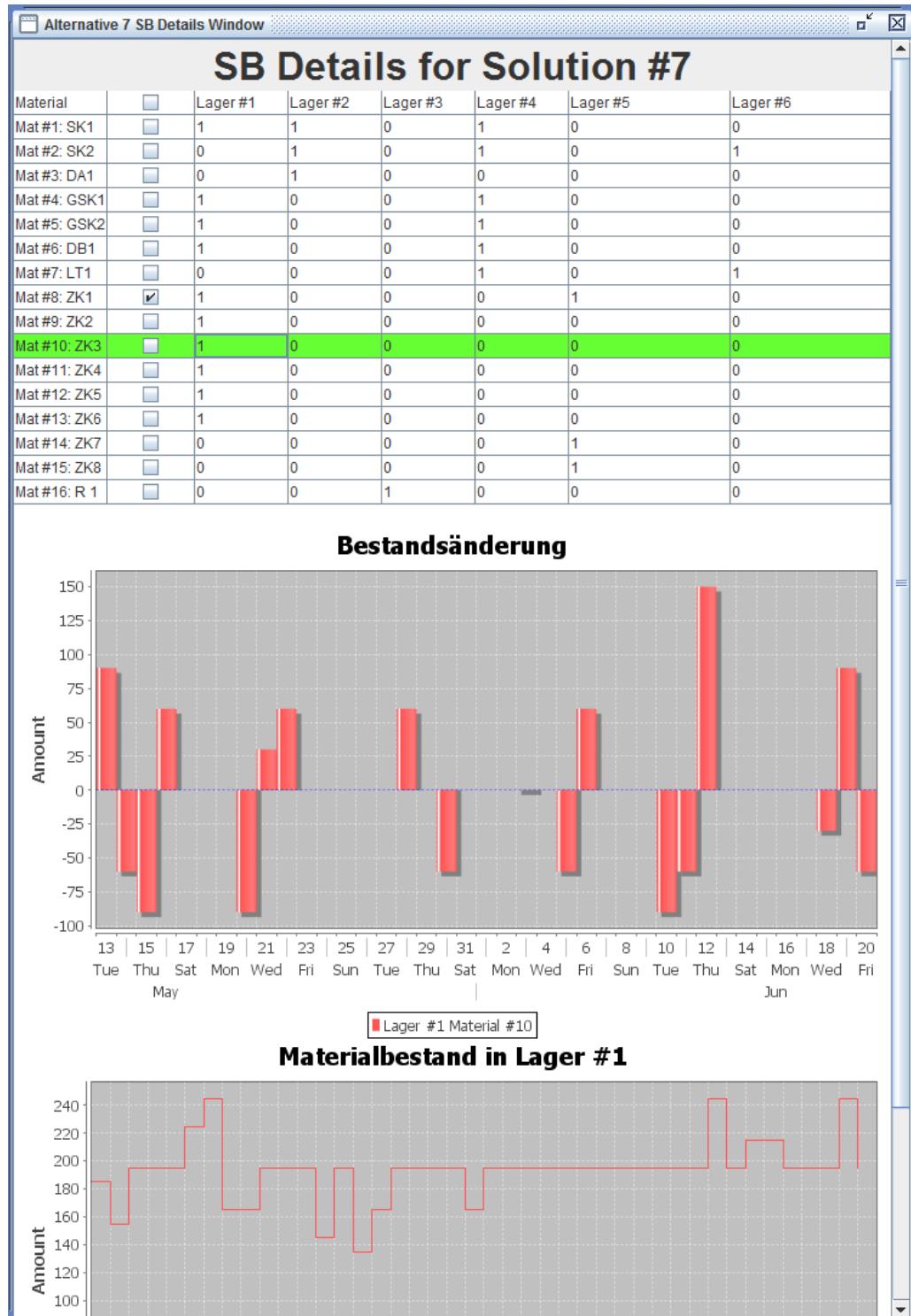


Abbildung 6.9: Detailfenster für Sicherheitsbestände

7 Evaluation

7.1 Szenario

Die Evaluation baut auf dem in Abbildung 2.1 vorgestellten Beispiel einer intra-organisatorischen Supply Chain auf. Es existieren drei verschiedene Produktgruppen, die in vier Werken produziert werden. Die Produkte der Gruppe B werden in zwei verschiedenen Werken hergestellt, wobei Komponenten aus Werk B1 zum Teil in Werk B2 zu weiteren verkaufsfähigen Produkten verarbeitet werden. Jedem Werk sind ein Wareneingangs- und ein Warenausgangslager zugeordnet. Das Warenausgangslager von Werk B1 dient als zentrales Auslieferlager für Komplettlieferungen und Kits.

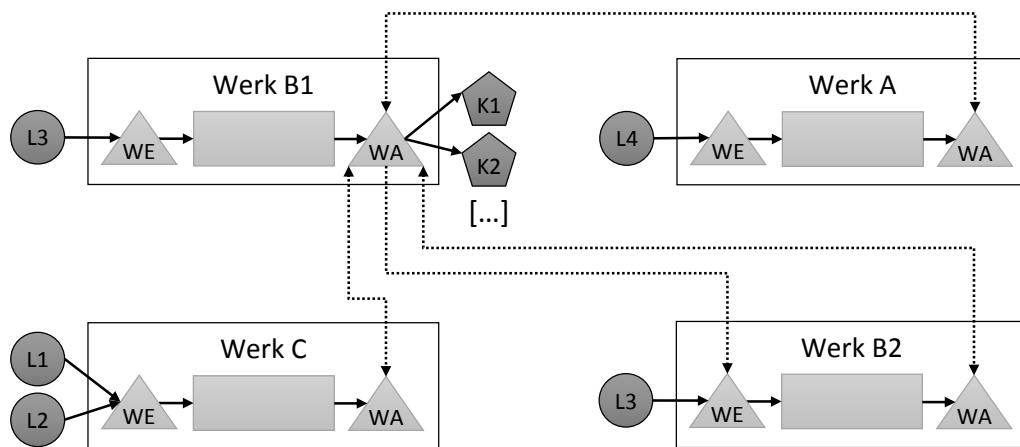


Abbildung 7.1: Liefernetzwerk des Evaluationsszenarios

In dem in Abbildung 7.1 dargestellten Liefernetzwerk werden die Produkte aus Tabelle 7.1 in den jeweiligen Werken innerhalb der Eigenfertigungszeit (EFZ) montiert, wobei die gesamte Wiederbeschaffungszeit (GWBZ) über alle Stücklistenkomponenten berechnet wird. Tabelle 7.2 enthält Informationen über die Lieferanten und Wiederbeschaffungszeiten (WBZ) der Kaufteile.

Tabelle 7.1: Eigengefertigte Produkte und Komponenten

Material	Wert	Werk	EFZ	GWBZ	Stückliste	Terminabweichung
A1	600 €	A	2	3	1xAM1	pünktlich
A2	900 €	A	3	6	1xAM2	leicht verspätet
A3	1.500 €	A	1	5	1xAM3	stark verspätet
B1_1	2.000 €	B1	3	7	1xBM1, 1xBM2, 1xBM3	pünktlich
B1_K1	700 €	B1	4	8	1xBM1, 2xBM2	leicht verspätet
B1_K2	600 €	B1	2	6	1xBM2, 2xBM3	pünktlich
B2_1	1.000 €	B2	2	11	1xB1_K1	pünktlich
B2_2	1.600 €	B2	3	10	1xB1_K2, 1xBM1	leicht verspätet
B2_3	600 €	B2	4	6	1xBM1, 2xBM3	leicht verspätet
C1	1.000 €	C	6	9	1xCM3, 4xCM2	pünktlich
C2	800 €	C	2	5	1xCM1, 4xCM2	pünktlich

Tabelle 7.2: Kaufteile

Material	Wert	Lieferant	WBZ	Terminabweichung
CM1	200 €	L1	1	pünktlich
CM2	100 €	L1	3	leicht verspätet
CM3	500 €	L2	1	pünktlich
CM4	1.000 €	L2	3	pünktlich
BM1	100 €	L3	1	pünktlich
BM2	200 €	L3	4	leicht verspätet
BM3	100 €	L3	2	pünktlich
AM1	400 €	L4	1	pünktlich
AM2	500 €	L4	3	pünktlich
AM3	1.000 €	L4	4	leicht verspätet

Die Produktstruktur der Produktgruppen A und C ist dabei durch eine einfache, einstufige Fertigung gekennzeichnet. Produkte der Gruppe B bestehen hingegen aus mehreren Stufen, wobei einige eigengefertigte Komponenten werksübergreifend verwendet werden. Abbildung 7.2 zeigt exemplarisch die Gozintographen für die in Werk B2 eigengefertigten Produkte B2_1 und B2_2. In diese gehen neben Kaufteilen auch die in Werk B1 eigengefertigten Komponenten B1_K1 und B1_K2 ein.

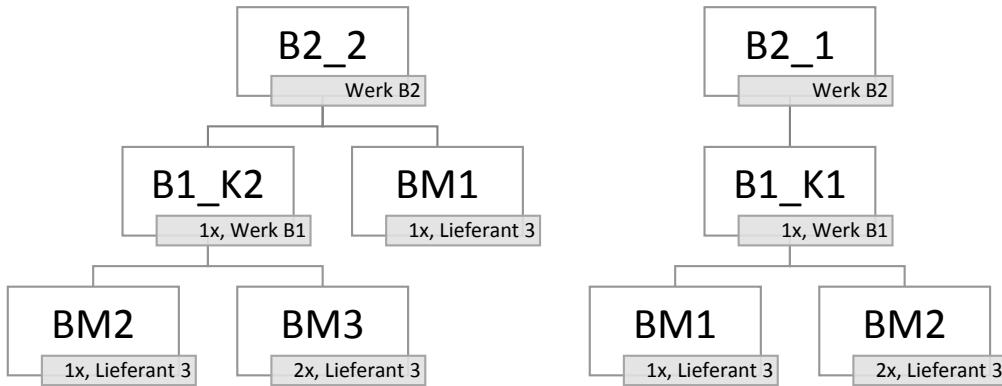


Abbildung 7.2: Gozintographen für Produkte der Gruppe B

Die beobachteten Lieferterminabweichungen werden zur Vereinfachung in drei Kategorien eingeteilt. Pünktliche Teile sind immer zum geplanten Eckendatum verfügbar. Leicht verspätete Teile können bis zu zwei Tage abweichen und Teile in der Kategorie mit starken Verspätungen bis zu fünf Tage. Abbildung 7.3 stellt die prozentualen Wahrscheinlichkeiten für eine Abweichung tagesgenau dar.

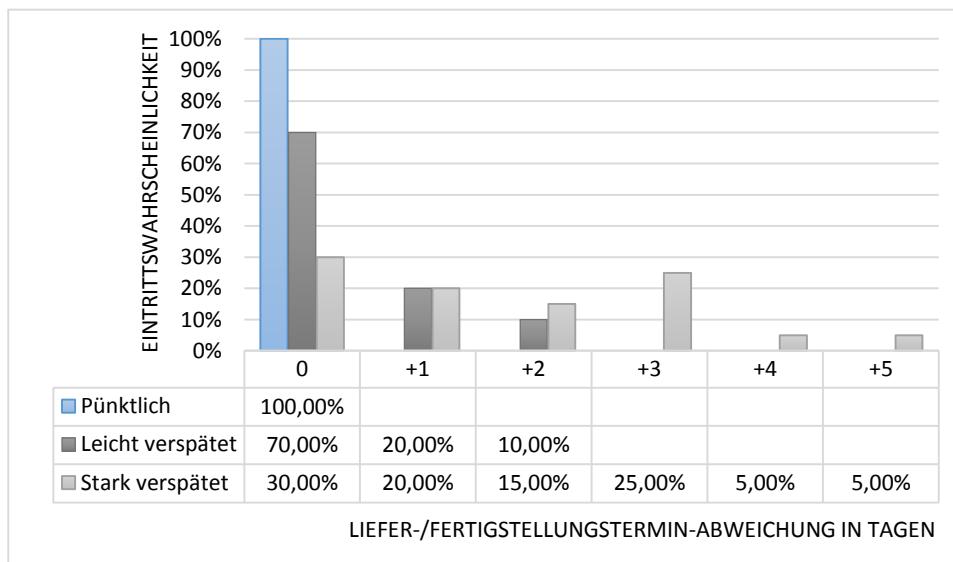


Abbildung 7.3: Verteilungen der Lieferterminabweichungen

Aufgrund der zuvor getroffenen Annahme, dass Projekte für Komplettlieferungen und Kits langfristig bekannt sind, wurden drei verschiedene Auftragsgrundtypen generiert, die sich in einem regelmäßigen Rhythmus über einen Zeitraum von vier Wochen wiederholen. Die daraus entstandenen Kundenaufträge sind in Tabelle 7.3 aufgelistet.

Tabelle 7.3: Kundenaufträge

Kundenauftrag 1		Bestelldatum: 09.06.2014
Position 1	2 x	A1
Position 2	1 x	B1_1
Position 3	2 x	B2_1
Position 4	1 x	C2
Kundenauftrag 2		Bestelldatum: 10.06.2014
Position 1	2 x	A2
Position 2	3 x	B2_2
Kundenauftrag 3		Bestelldatum: 16.06.2014
Position 1	2 x	A1
Position 2	1 x	B1_1
Position 3	2 x	B2_1
Position 4	1 x	C2
Kundenauftrag 4		Bestelldatum: 17.06.2014
Position 1	2 x	A2
Position 2	3 x	B2_2
Kundenauftrag 5		Bestelldatum: 23.06.2014
Position 1	2 x	A1
Position 2	1 x	B1_1
Position 3	2 x	B2_1
Position 4	1 x	C2
Kundenauftrag 6		Bestelldatum: 24.06.2014
Position 1	2 x	A2
Position 2	3 x	B2_2
Kundenauftrag 7		Bestelldatum: 30.06.2014
Position 1	2 x	A1
Position 2	1 x	B1_1
Position 3	2 x	B2_1
Position 4	1 x	C2
Kundenauftrag 8		Bestelldatum: 01.07.2014
Position 1	2 x	A2
Position 2	3 x	B2_2
Kundenauftrag 9		Bestelldatum: 09.06.2014
Position 1	1 x	A3
Position 2	2 x	B2_3
Position 3	2 x	C1
Kundenauftrag 10		Bestelldatum: 23.06.2014
Position 1	1 x	A3
Position 2	2 x	B2_3
Position 3	2 x	C1

Durch die MRP-Auflösung dieser Primärbedarfe²⁹⁵ sind insgesamt 130 Planaufträge entstanden, die jeweils einer Bestellanforderung, einem Fertigungsauftrag oder einer Umlagerbestellung entsprechen. Eine detaillierte Auflistung aller Planaufträge findet sich im Anhang in Tabelle 10.1.

7.2 Evaluation des proaktiven Verfahrens

7.2.1 Qualitätsindikatoren

Zur Bewertung der Lösungsgüte müssen Indikatoren herangezogen werden, die geeignet sind, die mehrdimensionalen Pareto-Fronten zu evaluieren. Im Rahmen der Forschung zum Thema Mehrzieloptimierung existieren dazu einige gängige, allgemein einsetzbare Indikatoren²⁹⁶:

Tabelle 7.4: Allgemeingültige Qualitätsindikatoren

Indikator	Beschreibung
Generational Distance	Schätzt die Entfernung der zu bewertenden Pareto-Front \mathcal{F}^1 zur realen Pareto-Front \mathcal{F}^* mittels euklidischer Distanzmessung zwischen den Zielwerten ab.
ϵ-Indikator	Gibt an, wie weit die Zielwerte einer Referenz-Pareto-Front \mathcal{F}^R verschlechtert werden müssen, bis diese durch die zu bewertende Pareto-Front \mathcal{F}^1 dominiert wird.
Hypervolumen	Beschreibt das durch die zu bewertende Pareto-Front \mathcal{F}^1 dominierte Volumen R^m in Bezug auf einen gegebenen Referenzpunkt.
Generalized Spread	Misst den Abstand zwischen den Lösungen einer Pareto-Front \mathcal{F}^1 unter Kenntnis der optimalen Pareto-Front \mathcal{F}^* und ermöglicht eine Aussage hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Verteilung der Lösungen.

Die Generational Distance der und ϵ -Indikator berücksichtigen vorwiegend die Konvergenz der Lösungen hinsichtlich der optimalen Zielwerte, wohingegen der Spread-Indikator nur die Diversität der jeweiligen Lösungen, was der Verteilung der Lösungen über die Pareto-Front entspricht, berücksichtigt. Das Hypervolumen vereint beide Kriterien²⁹⁷. Aufgrund der sinkenden Aussagekraft der Diversifikationsindikatoren und des exponentiell steigenden Berechnungsaufwands für das Hypervolumen bei hoher Zielanzahl²⁹⁸

²⁹⁵ Dabei wurde eine Transportzeit von einem Tag zwischen allen Standorten angenommen.

²⁹⁶ Siehe [Talb09], S. 350–357, [BNR08], S. 2, [TKL05], S. 125–127 und [OYS03], S. 879–882.

²⁹⁷ Siehe [DNA10], S. 5.

²⁹⁸ Vgl. [Bade09], S. XIII.

werden nur der ε -Indikator und die Generational Distance für die Experimente ausgewertet. Zusätzlich werden zwei problemspezifische Indikatoren definiert, die zur einfachen Beurteilung der Lösungsqualität einer Pareto-Front dienen.

Tabelle 7.5: Problemspezifische Qualitätsindikatoren

Indikator	Beschreibung
Durchschnittliche Liefertreue	Berechnet zuerst je Lösung einer Pareto-Front \mathcal{F}^1 die durchschnittlich erreichte Liefertreue und mittelt diesen Wert dann über alle enthaltenen Lösungen.
Durchschnittliche Kapitalbindung	Berechnet zuerst je Lösung einer Pareto-Front \mathcal{F}^1 die durchschnittlich erreichte Kapitalbindung je Tag vom Starttermin bis zum Endtermin des Szenarios und mittelt diesen Wert dann über alle enthaltenen Lösungen.

Die Vorteile der problemspezifischen Indikatoren liegen in der einfachen Interpretierbarkeit und darin, dass die originale Pareto-Front nicht bekannt sein muss. Bei der durchschnittlichen Liefertreue wird bewusst auf den Einsatz des Goal Programming verzichtet, um unabhängig von dem vorgegebenen Mindestzielwert der Liefertreue eine einheitliche Bewertung zu ermöglichen.

7.2.2 Einfluss der Parameter

7.2.2.1 Allgemeine Einstellungen

Einige Parameter bleiben im weiteren Verlauf der Evaluation konstant. Diese sind in Tabelle 7.6 aufgeführt. Der Parameter für die Sicherheitszeiten orientiert sich dabei an den maximal beobachteten Verspätungen. Durch den Parameter für den Vorlauf der Sicherheitsbestände wird der Aufbau des Sicherheitsbestands für ein Material bis zu anderthalb Wochen vor dem Eckendtermin des jeweiligen Planauftrags ermöglicht. Die maximale Kapitalbindung wurde so gewählt, dass nie alle Produkte der Kundenaufträge auf oberster Wertschöpfungsstufe gleichzeitig abgesichert werden können und lässt so eine Mängelsituation entstehen²⁹⁹.

²⁹⁹ In diesem Fall wurde die Grenze aufgrund der folgenden Vergleiche der Parameter jedoch bewusst so gewählt, dass einige wenige Kombinationen zu einer vollständigen Absicherung aller Kundenaufträge führen.

Tabelle 7.6: Allgemeine Evaluationsparameter

Indikator	Wert	Beschreibung
Maximaler Vorlauf für den Sicherheitsbestand	10 Tage	Ausgehend vom Eckendtermin des jeweiligen Planauftrags kann dessen Menge bis zu dieser Anzahl an Tagen im Voraus als Sicherheitsbestand aufgebaut werden.
Maximale Sicherheitszeit	5 Tage	Maximale Sicherheitszeit für einen Planauftrag.
Maximale Kapitalbindung	6000 €	Obergrenze für den Materialwert, der je Tag durch Sicherheitszeiten und Sicherheitsbestände verursacht werden darf.
Größe der Population	100	Anzahl der in jedem Evaluationsschritt generierten Lösungen.
Größe des Elite-Archivs	50	Anzahl der konstant beibehaltenen besten Lösungen.
Starttermin	20.05.2014	Starttermin für alle berücksichtigten Ereignisse.
Ende der Frozen Zone	27.05.2014	Vor diesem Termin dürfen keine Änderungen mehr vorgenommen werden.
Endtermin	25.07.2014	Datum, bis zu welchem mögliche Ereignisse berücksichtigt werden.
Liefertreuetoleranz	+1 Tag	Obergrenze der Lieferterminabweichung

Um bei mehreren Zielen alle Punkte einer Pareto-Front abzubilden, ist ein sehr großes Archiv notwendig³⁰⁰. Dabei steigt jedoch der Berechnungsaufwand für die Dominanzprüfungen neu generierter Lösungen an. Deswegen wurde als Kompromiss zwischen ausreichend verschiedenen Lösungen und dem Berechnungsaufwand eine Archivgröße von 50 gewählt.

Zusätzlich ist für die Funktionalität der allgemeinen Indikatoren eine Referenz-Pareto-Front generiert worden, die in diesem Fall einer 100%-igen Liefertreue bei jedem Auftrag entspricht³⁰¹.

7.2.2.2 Experimente

Um die Wirksamkeit der implementierten Maßnahmen bewerten zu können und eine effiziente Parameterkombination für die Evaluierung des Szenarios zu finden, werden in verschiedenen Experimenten folgende Parameter variiert:

³⁰⁰ Für Abschätzungen zur benötigten Größe vgl. [JC09], S. 2693.

³⁰¹ Aufgrund der Minimierung und der internen Implementierung der Indikatoren im *jMetal*-Framework, ist die direkte Verwendung der Front nicht möglich, da jeder Zielwert 0.0 entspricht, was zu Berechnungsfehlern führt. Deswegen ist eine Front mit 10 Lösungen erstellt worden, bei denen 9 Werte den Zielwert 0.0 erhalten und der jeweils zehnte Wert, der je Lösung immer einem anderen Kundenauftrag entspricht, einen Wert von 0.01 erhält.

Tabelle 7.7: Variable Evaluationsparameter

Indikator	Beschreibung
Evaluationen	Anzahl der zu evaluierenden Lösungen ³⁰²
initValidPercentage	Prozentanteil an gültigen Lösungen, die bei der Generierung der Ursprungsgeneration erzeugt werden müssen
initSBSZIntensity	Wahrscheinlichkeit für den Aufbau von Sicherheitsbestand und -zeit während der Generierung der Ursprungsgeneration
Repair	Aktivierung der Reparaturmechanismen
CrossoverRestricted	Anwendung des Restricted-Single-Point-Crossovers
CrossoverProbability	Wahrscheinlichkeit für einen Crossover
MutationRestricted	Anwendung des Restricted-Bit-Flip-Mutators
MutationFactor	Chance, dass ein Gen mutiert wird. Ergibt sich aus dem Mutation-Factor geteilt durch die gesamte Anzahl der Gene.
SBSZIntensity	Wahrscheinlichkeit für den Aufbau von Sicherheitsbestand und -zeit in der Mutation
DynamicMutation	Dynamische Anpassung der SBSZIntensity in Abhängigkeit von der Anzahl der gültigen und ungültigen Lösungen je Generation

Tabelle 7.8: Parameter der Experimente

Experiment	1	2	3	4	5	6	7
Evaluationen	15000	50000	15000	15000	50000	15000	15000
initValidPercentage	0.9	0.9	0.2	0.9	0.9	0.0	0.9
initSBSZIntensity	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-	0.1
Repair	true	true	true	false	false	false	true
CrossoverRestricted	true	true	true	true	true	false	false
CrossoverProbability	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
MutationRestricted	true	true	true	true	true	false	true
MutationFactor	1	1	1	1	1	1	1
SBSZIntensity	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-	0.6
DynamicMutation	true	true	true	true	true	-	true
	8	9	10	11	12	13	14
Evaluationen	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000
initValidPercentage	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
initSBSZIntensity	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Repair	true	true	true	true	true	true	true
CrossoverRestricted	true	true	true	true	true	true	true
CrossoverProbability	0.95	0.4	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8
MutationRestricted	true	true	true	false	true	true	true
MutationFactor	1	1	1	1	1	10	20
SBSZIntensity	0.6	0.6	0.6	-	0.6	0.6	0.6
DynamicMutation	true	true	true	-	false	true	true

³⁰² Zur besseren Vergleichbarkeit der Experimente wird in der Evaluation dieses Kriterium anstatt der später real eingesetzten Zeitgrenze verwendet.

Die in Tabelle 7.8 dargestellten 14 Grundexperimente sind anhand der Variationsmöglichkeiten der Evaluationsparameter generiert worden. Das Experiment 1 dient als Ausgangsbasis, dessen Parameter aufgrund erster Auswertungserfahrungen und allgemeiner Empfehlungen aus der Literatur gewählt sind. Ausgehend davon werden sukzessive die weiteren Parameter variiert sowie Reparaturverfahren, der Restricted-Single-Point-Crossover und die Restricted-Bit-Flip-Mutation deaktiviert. Zur besseren Übersicht sind die veränderten Parameter fett markiert.

Bei jedem Experiment erfolgte nach 300 evaluierten Lösungen eine Zwischenberechnung der Qualitätsindikatoren für das aktuelle Archiv. Zusätzlich wurden die gesamte Laufzeit sowie die Anzahl der gültigen Lösungen und die Anzahl der Lösungen gemessen, welche die verschiedenen Restriktionen verletzt haben³⁰³. Aufgrund der stochastischen Einflüsse wurde jedes Experiment fünf Mal wiederholt. In der Darstellung der Auswertungsergebnisse wird immer Bezug auf den Mittelwert der Wiederholungen genommen. Die Ergebnisse der Experimente sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 7.9: Qualitätsindikatoren der Experimente

#	Kommentar	LT 15.000	Kapital 15.000	LT Max	Kapital Max
1	Ausgangsbasis	79,3%	2.721,90 €		
2	Mehr Iterationen	79,5%	2.566,10 €	84,9%	2.912,00 €
3	Initial weniger gültige Lösungen	78,7%	2.629,10 €		
4	Ohne Reparatur	77,8%	2.471,00 €		
5	Ohne Reparatur, mehr Iterationen	77,9%	2.492,20 €	78,6%	2.637,20 €
6	Ohne alle Spezialmaßnahmen		nicht lösbar		
7	Ohne Restricted Crossover	78,7%	2.400,90 €		
8	CrossoverProbability sehr hoch	79,4%	2.381,60 €		
9	CrossoverProbability niedrig	79,2%	2.701,90 €		
10	CrossoverProbability mittel	79,2%	2.653,70 €		
11	Ohne Restricted Mutator	78,9%	2.453,70 €		
12	Ohne DynamicMutation	80,1%	2.445,70 €		
13	MutationFactor mittel	85,3%	2.819,00 €		
14	MutationFactor hoch	92,3%	2.832,20 €		

In Tabelle 7.9 werden jeweils die durchschnittliche Liefertreue und Kapitalbindung des Archivs nach 15.000 Iterationen dargestellt sowie für länger laufende Experimente die gleichen Indikatoren für die finale Archivgeneration. Auf eine gesonderte Darstellung der Generational Distance und des ϵ -Indikators wird an dieser Stelle verzichtet, da beide Indikatoren über alle Experimente hinweg eine sehr hohe negative Korrelation mit der

³⁰³ Die Experimente wurden auf einem Windows Server 2008 R2 mit zwei E5620 Prozessoren mit 2,4 GHz und 48GB Arbeitsspeicher ausgeführt. Dabei wurde jedem Experiment jeweils ein Kern zugeordnet.

durchschnittlichen Liefertreue aufweisen und diese einfacher als die Indikatoren zu interpretieren ist³⁰⁴.

Tabelle 7.10: Statistiken der Experimente

#	Zeit (min)	Valide	Inv KAP	Inv SBAB	Inv FZ	Inv SBBIL	Inv FZABIL
1	47,3	9441	5446	5	170	1019	12
2	85,3	31770	18129	20	560	2538	0
3	47,3	9642	5257	3	174	876	1
4	34,9	9378	4839	1	150	530	0
5	120,4	30982	17000	1	525	1479	0
6	-	-	-	-	-	-	-
7	45,8	9318	5568	5	161	1045	13
8	43,0	9694	5204	6	156	1039	1
9	44,7	9731	5168	5	122	797	0
10	27,4	9717	5182	2	175	744	0
11	48,8	9964	4924	6	118	1092	10
12	51,8	10307	4589	26	94	2087	3
13	17,5	3500	11374	2201	279	12779	24
14	12,8	3045	11828	6775	171	14566	26

In Tabelle 7.10 sind die Statistikinformationen der Experimente aufgeführt. Dazu zählt neben der Laufzeit auch die Verteilung zwischen den generierten gültigen und ungültigen Lösungen. Unter den validen Lösungen werden alle direkt gültig generierten oder durch Reparatur gültig modifizierten Lösungen zusammengefasst. Die weiteren Spalten geben an, wie viele Lösungen die Kapitalbindung verletzt haben (Inv KAP), ungültig bezüglich des mehrfachen Sicherheitsbestandsabbaus (Inv SBAB), der Frozen Zone (Inv FZ) oder der Sicherheitsbestandsbilanz (Inv SBBIL) waren. Zusätzlich erfasst die letzte Spalte Lösungen, die nach der Reparatur der Bilanz die Frozen Zone erneut verletzen und nicht weiter repariert wurden (Inv FZABIL).

Experiment 1 erreicht nach 15.000 Evaluationen eine durchschnittliche Liefertreue von 79,3%. Ohne Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten wird im Szenario nur eine durchschnittliche Liefertreue von 59% erreicht. Wird die Laufzeit auf 50.000 Evaluationen erhöht, so steigt sich die durchschnittliche Liefertreue auf bis zu 84,9%.

Im Vergleich dazu wird in Experiment 3 mit einem um fast 1% geringeren Endwert deutlich, dass die Generierung vieler valider Ausgangslösungen vorteilhaft ist³⁰⁵. Die Experimente 4 und 5 zeigen, dass bei Verzicht auf das Reparaturverfahren die Lösungsqualität

³⁰⁴ Vgl. dazu Berechnungen und Grafik in Anhang 10.2.1.

³⁰⁵ Es ist zu beachten, dass bei diesem Experiment weiterhin nur 10% der Gene mit Werten größer Null initialisiert worden sind, wodurch bei jedem Experiment einige gültige Lösungen in die Ausgangspopulation eingegangen sind.

stark abfällt. Aufgrund der weiteren aktiven Maßnahmen werden zwar gültige Lösungen generiert, allerdings nur in Bereichen, welche den bisherigen Lösungen bezüglich der durchschnittlichen Liefertreue sehr ähnlich sind. Bessere Lösungen, die mit kleinen Reparaturen zur Steigerung der Archivqualität beitragen könnten, entfallen. Zur Prüfung der Notwendigkeit der spezifischen Anpassungen wurde Experiment 6 gestartet, welches jedoch ohne Reparaturmaßnahmen und speziell angepasste Operatoren keine einzige gültige Lösung erzeugen konnte.

Um die Effizienz des Restricted-Single-Point-Crossovers zu testen, wurden die Experimente 7 bis 10 durchgeführt. Ohne den eingeschränkten Crossover sinkt die erreichte durchschnittliche Liefertreue leicht, da insgesamt weniger valide Lösungen produziert werden. Dies belegt, dass durch die gezielte Trennung an zusammenhängenden Blockgrenzen eine höhere Lösungsqualität erreicht werden kann. Die Variation der Wahrscheinlichkeit für den Crossover hat jedoch nur geringe Auswirkungen.

Die Experimente 11 bis 14 variieren den Mutationsoperator. Wieder ist ersichtlich, dass der Einsatz eines Standard Bit Flip Mutationsoperators insgesamt zu schlechteren Ergebnissen führt. Experiment 12 deutet darauf hin, dass ohne die dynamische Anpassung des Parameters *SBSZIntensity* eine bessere Lösungsgüte erreicht werden kann. Wird der Verlauf der *SBSZIntensity* in Experiment 1 analysiert, ist zu erkennen, dass diese immer gegen 1 strebt. Aus diesem Grund werden mehr invalide Lösungen erzeugt. Im Kurzfristbereich bis 15.000 Evaluationen führt dies zu einer schlechteren durchschnittlichen Liefertreue. Durch die Experimente 13 und 14 wird deutlich, dass die Lösungsqualität durch eine gesteigerte Mutationsrate deutlich verbessert werden kann.

Die durchgeführten Experimente zeigen, dass bis auf die dynamische Anpassung der Mutationsrate alle zusätzlich eingeführten Maßnahmen eine Verbesserung der Lösungsqualität in Form einer gesteigerten durchschnittlichen Liefertreue herbeiführen. Am effizientesten erweist sich dabei die Steigerung der Mutationsrate. Dadurch wird im Bereich der schon guten Lösungen eine stärkere lokale Suche im Lösungsraum forciert, was schnell zu besseren Ergebnissen führt. Ergänzend dazu werden durch den neuen Crossover Operator mehr gültige Lösungen in anderen Bereichen des Lösungsraums generiert, die eine breitere Exploration gewährleisten.

Anhand der Statistiken lässt sich feststellen, dass die Laufzeit des Verfahrens maßgeblich durch die Simulation beeinflusst wird. Vergleicht man das Ausgangsexperiment mit den Experimenten 13 und 14, zeigt sich, dass die benötigte Laufzeit fast im Verhältnis 1:1 mit der Anzahl gültiger und somit simulierter Lösungen korreliert. Mögliche Varianten zur Beschleunigung der Simulation werden in Kapitel 7.2.4 aufgeführt. Die Laufzeit der Reparaturverfahren ist hingegen fast zu vernachlässigen, da trotz der höchsten Anzahl an

restriktionsverletzenden – und somit der zu reparierenden Lösungen – in den Experimenten 13 und 14 die kürzesten Laufzeiten erreicht worden sind.

Die erfolgreichste Parameterkombination aus Experiment 14 wurde noch einmal mit längeren Laufzeiten untersucht. Insbesondere der Einfluss der weiteren Parameter des Mutationsoperators sollte analysiert werden. Dazu sind die folgenden Experimente durchgeführt worden:

Tabelle 7.11: Parameter der erweiterten Experimente

Parameter	Experiment		
	15	16	17
Evaluationen	36000	36000	36000
initValidPercentage	0.9	0.9	0.9
initSBSZIntensity	0.1	0.1	0.1
Repair	true	true	true
CrossoverRestricted	true	true	true
CrossoverProbability	0.8	0.8	0.8
MutationRestricted	true	true	false
MutationFactor	20	20	20
SBSZIntensity	0.6	0.6	-
DynamicMutation	true	false	-

Die Ergebnisse in den beiden nachfolgenden Tabellen zeigen eindeutig, dass bei einer hohen Mutationsrate zur effizienten Exploration des Lösungsraums sowohl der Restricted Mutator benötigt wird, als auch die dynamische Anpassung der Einsatzchance für Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten. Sind beide Parameter aktiviert, erreicht Experiment 15 die optimale Pareto-Front nach weniger als 36.000 Iterationen. Wird jedoch ein Parameter deaktiviert, erfolgt die Mutation so ungezielt, dass fast nur noch invalide Lösungen hinsichtlich der Kapitalbindung generiert werden.

Tabelle 7.12: Qualitätsindikatoren der erweiterten Experimente

#	Kommentar	LT 15.000	Kapital 15.000	LT Max	Kapital Max
15	Crossover hoch, MutationFactor hoch	92,6%	3.098,90 €	100%	3.030,40 €
16	Wie 15 ohne DynamicMutation	77,6%	2.976,40 €	78,8%	2.974,60 €
17	Wie 15 ohne Restricted Mutator	75,6%	3.042,90 €	76,4%	3.067,10 €

Tabelle 7.13: Statistiken der erweiterten Experimente

#	Zeit (min)	Valide	Inv KAP	Inv SBAB	Inv FZ	Inv SBBIL	Inv FZABIL
15	26,4	7406	28467	20745	204	35361	25
16	2,1	310	35324	3248	3212	29846	265
17	1,3	93	35673	681	3452	19478	133

Über alle Experimente hinweg betrachtet ist die Aussagekraft der durchschnittlichen Kapitalbindung gering. Diese kann sowohl einen geringen Wert, aufgrund der Nichtausnutzung der vorhandenen Kapitalreserven, als auch einen hohen Wert, aufgrund des ineffizienten Einsatzes der Sicherheitsmaßnahmen, annehmen. Abbildung 7.4 verdeutlicht den Zusammenhang des Indikators mit der durchschnittlichen Liefertreue anhand der Ergebnisse von Experiment 15. Erst mit steigender durchschnittlicher Liefertreue lässt sich über die durchschnittliche Kapitalbindung besser ableiten, wie gut das vorhandene Kapital ausgenutzt wird³⁰⁶. Insgesamt kann der Indikator jedoch nicht generell zur Beurteilung der Lösungsgüte dienen, sondern nur als zusätzliche Referenz fungieren.

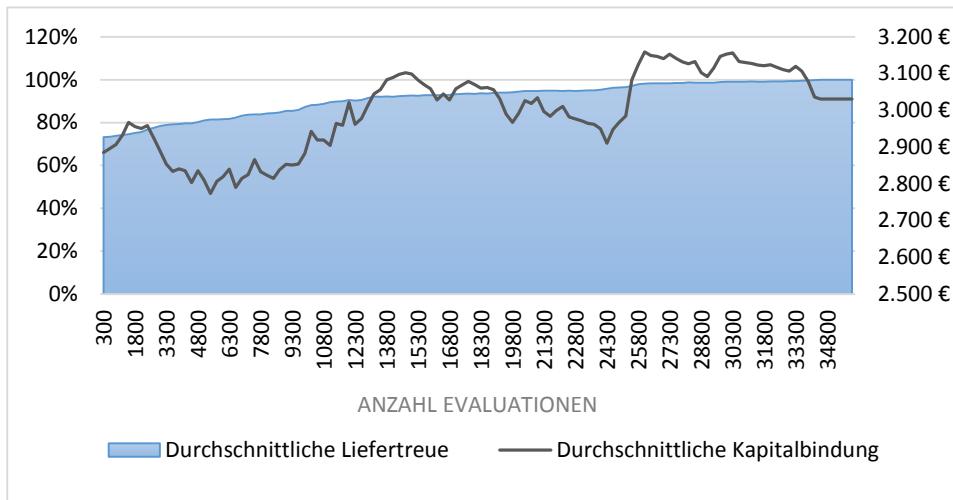


Abbildung 7.4: Liefertreue und Kapitalbindung im Vergleich

Aus Abbildung 7.4 wird zudem ersichtlich, dass zunächst ein schneller Anstieg der Lösungsgüte erfolgt. Nach dem ersten Drittel der evaluierten Lösungen verlangsamt sich die Verbesserung der Liefertreue signifikant. Übertragen auf den Einsatz in realen MRP-Umgebungen bedeutet dies, dass zunächst schnell hinreichend gute Lösungen gefunden werden. Je mehr Zeit dem Verfahren jedoch zur Verfügung steht, umso weiter lässt sich die Lösungsqualität steigern.

7.2.3 Vergleich mit der Zufallssuche

Um die Effizienz des genetischen Verfahrens zu zeigen, wird der Evaluationslauf aus Experiment 15 mit einer Zufallssuche verglichen. Dazu wird im *jMetal*-Framework die Klasse *RandomSearch* auf das Problem angewendet. Neben dem Einsatz eines Archivs

³⁰⁶ Aufgrund der Tatsache, dass der Indikator vom Startdatum bis zum Enddatum des Szenarios berechnet wird, erreicht der Durchschnittswert nie die maximal vorgegebene Kapitalbindung, da zu manchen Zeitpunkten keine Sicherheitsmaßnahmen eingeplant werden können.

für die nicht dominierten Lösungen ist der einzige, zusätzlich aktivierte Parameter für die Zufallssuche die Reparatur der Nebenbedingungen. Die Dauer der Zufallssuche ist auf maximal 250.000 Evaluationen beziehungsweise die maximale Laufzeit von Experiment 15 beschränkt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.14 und Tabelle 7.15 zusammengefasst.

Tabelle 7.14: Qualitätsindikatoren der Zufallssuche

#	Kommentar	LT 15.000	Kapital 15.000	LT Max	Kapital Max
18	Zufallssuche mit 250.000 Evaluationen	74,0	2.939,37 €	76,95%	3.047,28 €

Tabelle 7.15: Statistiken der Zufallssuche

#	Zeit (min)	Valide	Inv KAP	Inv SBAB	Inv FZ	Inv SBBIL	Inv FZABIL
18	20,8	4561	244368	3648	24898	151355	969

Bezüglich der maximal erreichten durchschnittlichen Liefertreue schneidet die Zufallssuche deutlich schlechter ab als alle genetischen Kombinationen. Insbesondere anhand der Statistiken ist ersichtlich, dass der Lösungsraum sehr viele invalide Lösungen umfasst. An dieser Stelle profitiert das evolutionäre Verfahren stark von der gezielt gesteuerten Suche.

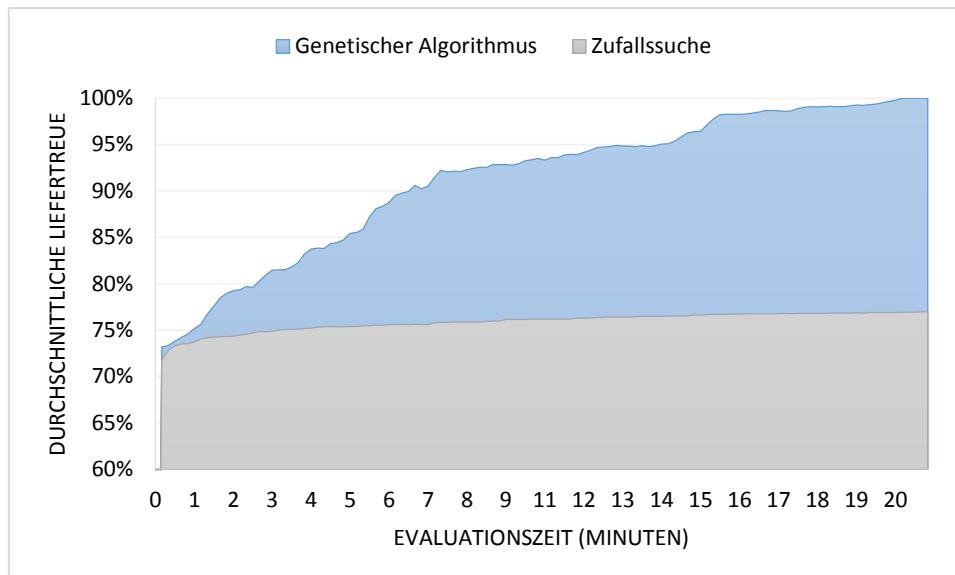


Abbildung 7.5: Vergleich des genetischen Algorithmus mit der Zufallssuche

In Abbildung 7.5 wird für beide Verfahren die erreichte durchschnittliche Liefertreue in Abhängigkeit der Laufzeit gegenübergestellt. Während beide Verfahren zu Beginn ähnliche Liefertreuwerte erreichen, kann die Zufallssuche kaum eine signifikante Verbesserung über den Zeitverlauf erzielen, wohingegen der genetische Algorithmus eine klare Steigerung der Qualität der generierten Lösungen aufweist.

7.2.4 Optimierung der Laufzeit

Die Laufzeit der durchgeführten Experimente kann nur als Richtwert dienen. Zur Optimierung des Verfahrens für den Einsatz in noch größeren Szenarien eignen sich zwei verschiedene Ansätze.

Zuerst lassen sich die Berechnungen parallelisieren. So kann anstatt einer parallelen Durchführung mehrerer gleicher Experimente, wie in dieser Evaluation, auch eine Parallelisierung der Fitnessbewertung der Lösungen erfolgen. Dazu werden mehrere Simulationsinstanzen gleichzeitig aktiviert, wodurch sich die benötigte Zeit zur Evaluierung einer Generation um einen linearen Faktor, abhängig von der Anzahl der parallelen Instanzen, reduziert.

Der zweite Ansatz wirkt der zunehmenden Ineffizienz von rein dominanzbasierten Verfahren bei steigender Zielanzahl entgegen³⁰⁷. Durch die Steigerung der Ziele erhöht sich die Anzahl der nicht mehr durch die Pareto-Dominanz vergleichbaren Lösungen. Dadurch wird der Suchprozess vorwiegend durch einfache Diversitätskriterien gesteuert anstatt gezielt auf die Approximation der realen Pareto-Front zuzusteuern. Um diese Problematik zu vermeiden existieren zwei Gegenmaßnahmen³⁰⁸:

- **Reduktion der Ziele:** Vor dem Optimierungsprozess können mehrere Ziele aggregiert werden. Dazu können alle Kundenaufträge, die nicht im nächsten rollierenden Schritt fixiert werden, auf Projektebene aggregiert werden. Alternativ können auch durch eine Vorab-Evaluation nicht miteinander konkurrierende, indirekte Ziele oder immer pünktliche Aufträge entfernt werden.
- **Verbesserung der Präferenzrelation:** Neben dem Kriterium der Pareto-Dominanz können weitere, feiner granulierte Auswahlkriterien angewandt werden. Aus der zweiten Maßnahme ist die Klasse der indikatorbasierten Algorithmen hervorgegangen. Diese setzen zur Steuerung des Suchprozesses zusätzlich Metriken ein, die zuvor nur zur Messung der Güte einer Pareto-Front verwendet wurden³⁰⁹. Ein Repräsentant dieser Klasse ist der SMS-EMOA (S-Metrik Selektion Evolutionärer Mehrziel-Optimierungs-Algorithmus)³¹⁰, der das Hypervolumen verwendet. Dieser ist jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nicht für die Evaluation derartig vieler Ziele geeignet. Aufgrund der generischen Implementierung können jedoch zukünftig entstehende effizientere Algorithmen problemlos adaptiert werden.

³⁰⁷ Vgl. [LYL+13], S. 261 f. und [FG10], S. 299 f.

³⁰⁸ Siehe [JC09], S. 2693.

³⁰⁹ Vgl. [Talb09], S. 341–343.

³¹⁰ Vgl. [BNR08] und [BNE07].

7.3 Einsatzkriterien für Sicherheitsbestände und Sicherheitszeiten

Um eine Abschätzung über den Einsatz von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten vornehmen zu können, wurde für die finalen Archive aus dem Experiment 15 für jedes Material erfasst, wie oft die jeweilige Sicherheitsmaßnahme eingesetzt wurde³¹¹. Die Ergebnisse werden in Tabelle 7.16 aufgelistet³¹².

Tabelle 7.16: Verteilung der Sicherheitsmaßnahmen

Material	Sicherheitszeit	Aufbau von Sicherheitsbestand	Abbau von Sicherheitsbestand
A1	0,0	10,8	8,4
A2	5,4	54,6	49,6
A3	22,6	50,0	28,2
AM1	0,0	11,4	5,4
AM2	0,0	6,2	4,6
AM3	0,0	10,4	0,6
B1_1	0,0	1,2	1,2
B1_K1	2,2	16,2	15,6
B1_K2	0,0	1,6	1,6
B2_1	0,0	37,2	34,0
B2_2	0,0	50,2	50,2
B2_3	29,6	40,0	18,4
BM1	0,0	125,4	79,6
BM2	40,4	104,6	70,0
BM3	0,0	66,8	30,2
C1	0,0	0,2	0,2
C2	0,0	7,2	0,4
C3	0,0	0,0	0,0
CM1	0,0	39,0	24,8
CM2	11,6	65,6	77,6
CM3	0,0	0,2	0,2
CM4	0,0	0,0	0,0
CM5	0,0	0,0	0,0

Teile, die in viele Produkte und Aufträge eingehen und bei denen Verspätungen beobachtet worden sind, wie beispielsweise BM2, werden besonders häufig abgesichert. Dabei

³¹¹ Die Messung bezieht sich nur auf die Anzahl der Werte, die ungleich Null sind. Eine Betrachtung der Höhe der Sicherheitszeiten und des Sicherheitsbestandsvorlaufs wurde aufgrund der nur auf dieses Szenario beschränkten Aussagekraft nicht durchgeführt.

³¹² Dabei erfolgte keine Normalisierung; die absolute Höhe der Werte ist zwischen verschiedenen Materialien entsprechend nicht vergleichbar.

kommen sowohl Sicherheitsbestände, als auch Sicherheitszeiten zum Einsatz. Dementsprechend werden daraus hergestellte Produkte ohne Abweichungen im Produktionsprozess wie B1_1 auf oberster Ebene fast gar nicht abgesichert. Einzelne Ausreißer werden durch Lösungen verursacht, die BM2 nicht für jeden Auftrag entsprechend absichern.

Die größere Tendenz zu Sicherheitsbeständen wird bei genauerer Betrachtung durch die Struktur der regelmäßig wiederholten Kundenaufträge verursacht. Die ebenfalls hohen Werte für den Abbau von Sicherheitsbeständen zeigen, dass die Möglichkeit der dynamischen Sicherheitsbestände intensiv eingesetzt wird. Sicherheitszeiten können entsprechend zur Absicherung von unregelmäßigen Aufträgen mit seltener verwendeten Materialien dienen.

Auffällig ist, dass teilweise auch für pünktliche Kaufteile ein Sicherheitsbestand angelegt wird. Daraus lässt sich ableiten, dass im Szenario die Kapitalgrenze zu hoch gewählt worden ist, da nach der vollständigen Absicherung der Kundenaufträge noch ausreichend Kapital für diese Sicherheitsbestände vorhanden ist. Durch einen einfachen Ausschluss dieser Kaufteile lässt sich dem jedoch entgegen wirken. Dazu wurde Experiment 19 mit den gleichen Parametern wie Experiment 15 gestartet. Die Materialien BM1, CM1, BM3, CM4, AM2, AM1 und CM3 sind in Experiment 19 jedoch vom Sicherheitsbestand ausgeschlossen. An den Auswertungsergebnissen in Tabelle 7.17 und Tabelle 7.18 ist ersichtlich, dass sich dadurch die Lösungsqualität steigern lässt. Insgesamt wurden mehr gültige Lösungen generiert und weniger Lösungen, die den Sicherheitsbestandsabbau oder die Bilanz verletzen. Dies führt zu einem schnelleren Anstieg der durchschnittlichen Liefertreue, so dass das Maximalergebnis von 100% durch Experiment 19 schon nach 27.300 Evaluationen erreicht wurde, wohingegen Experiment 15 dafür im Durchschnitt 34.500 Evaluationen benötigte. Pünktliche Kaufteile sind also, soweit wie möglich, in den jeweiligen Lagern von der Sicherheitsbestandsberechnung auszuschließen. Ebenso können beispielsweise projektspezifische Materialien mit unregelmäßigem Bedarf im Voraus ausgeschlossen werden, wodurch zusätzlich das Risiko von Sicherheitsbeständen ohne zukünftige Bedarfe gesenkt wird.

Tabelle 7.17: Qualitätsindikatoren bei ausgeschlossenen Sicherheitsbeständen

#	Kommentar	LT 15.000	Kapital 15.000	LT Max	Kapital Max
15	Crossover hoch, MutationFactor hoch	92,6%	3.098,90 €	100%	3.030,40 €
19	Wie 15 mit SB Ausschluss	93,6%	2.892,70 €	100%	3.156,70 €

Tabelle 7.18: Statistiken bei ausgeschlossenen Sicherheitsbeständen

#	Zeit (min)	Valide	Inv KAP	Inv SBAB	Inv FZ	Inv SBBIL	Inv FZABIL
15	26,4	7406	28467	20745	204	35361	25
19	27,5	7792	28061	17579	225	34782	45

Wie erwartet, ergibt sich hinsichtlich der Verteilung der Sicherheitsmaßnahmen eine deutlichere Verteilung nur auf unpünktliche Kaufteile und Produkte sowie pünktliche Produkte mit unpünktlichen Materialien in der Stückliste.

Tabelle 7.19: Verteilung der Sicherheitsmaßnahmen nach Einschränkung der Sicherheitsbestände

Material	Sicherheitszeit	Aufbau von Sicherheitsbestand	Abbau von Sicherheitsbestand
A1	0,0	9,0	3,6
A2	11,2	60,8	46,8
A3	11,2	50,0	16,0
AM1	0,0	0,0	0,0
AM2	0,0	0,0	0,0
AM3	8,6	0,0	0,0
B1_1	0,0	5,8	5,6
B1_K1	17,0	41,2	40,4
B1_K2	0,0	7,0	7,0
B2_1	0,0	26,2	18,8
B2_2	3,0	50,0	50,0
B2_3	11,6	47,0	17,0
BM1	0,0	0,0	0,0
BM2	43,0	91,8	51,6
BM3	0,0	0,0	0,0
C1	0,0	0,0	0,0
C2	0,0	10,6	7,4
C3	0,0	0,0	0,0
CM1	0,0	0,0	0,0
CM2	9,2	60,8	58,0
CM3	0,0	0,0	0,0
CM4	0,0	0,0	0,0
CM5	0,0	0,0	0,0

Generell kann die aus den vorliegenden Daten extrapolierte Information nur einen Hinweis auf die Einsatzkriterien für diese speziell betrachtete Supply Chain und Auftragsstruktur geben. Aufgrund der Flexibilität durch die Eingabemöglichkeit unterschiedlicher Szenarien lassen sich mit dem vorliegenden Verfahren verschiedene Abwandlungen dieser Struktur hinsichtlich allgemeiner Einsatzkriterien untersuchen. Allgemein festzuhalten ist jedoch, dass bei der gemeinsamen Planung beider Sicherheitsmaßnahmen sowohl Sicherheitsbestände, als auch Sicherheitszeiten zur Steigerung der Liefertreue eingesetzt werden.

7.4 Skalierbarkeit

Zur Einschätzung der Skalierbarkeit des Verfahrens wurde das Szenario aus Kapitel 7.1 um die doppelte Auftragsanzahl erweitert. Dazu sind die bisher vorhandenen Aufträge mit gleich bleibendem zeitlichem Abstand untereinander ab dem 07.07.2014 noch einmal eingeplant worden, wodurch sich insgesamt eine Verdoppelung des Planungszeitraums ergibt. Das resultierende Szenario enthält insgesamt 20 Aufträge mit 240 Planaufträgen. Zur Verbesserung der Laufzeit sind pünktliche Kaufteile vom Sicherheitsbestand in allen Lagerorten ausgeschlossen worden.

Das Szenario wurde in Experiment 20 mit den gleichen Parametern wie bei Experiment 19 gestartet. Für das Experiment 21 wurde die Anzahl der Evaluationen auf 72.000 erhöht. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen aufgeführt:

Tabelle 7.20: Qualitätsindikatoren bei 20 Aufträgen

#	Kommentar	LT 15.000	Kapital 15.000	LT Max	Kapital Max
19	Crossover hoch, MutationFactor hoch	93,6%	2.892,70 €	100%	3.156,70 €
20	Wie Experiment 19 mit 20 Aufträgen	81,5%	2.762,70 €	90,4%	2.984,20 €
21	Wie Experiment 19 mit 72.000 Iterationen und 20 Aufträgen	82,2%	2.705,50 €	100%	3.064,80 €

Tabelle 7.21: Statistiken bei 20 Aufträgen

#	Zeit (min)	Validé	Inv KAP	Inv SBAB	Inv FZ	Inv SBBIL	Inv FZABIL
19	27,5	7792	28061	17579	225	34782	45
20	63,1	7323	28569	11619	111	35032	7
21	80,1	14539	57350	28562	115	70305	10

Mit einer Verdoppelung der Kunden- und Planauftragsanzahl geht in etwa auch eine Verdoppelung der Laufzeit einher. Da im Vergleich von Experiment 19 und 20 ungefähr gleich viele gültige Lösungen erzeugt wurden, resultiert diese Laufzeitverlängerung fast ausschließlich aus den genetischen Ablaufschritten. Neben der verlängerten Laufzeit für die Dominanzprüfung und Selektion im Archiv, verursachen auch die Reparaturverfahren einen linearen Anstieg hinsichtlich der Berechnungszeit.

Hinsichtlich der Lösungsgüte werden bei gleicher Evaluationsanzahl jedoch schlechtere Zielwerte erreicht, erst in Experiment 21 werden ab 59.000 Iterationen 100% durchschnittliche Liefertreue erreicht. Diese wurde bei Experiment 19 schon bei etwas weniger als 38.000 Iterationen erreicht.

Aus den Experimenten lässt sich ableiten, dass das Verfahren hinsichtlich der Skalierung akzeptable Laufzeitsteigerungen aufweist. Bei genauerer Betrachtung benötigt jedoch die Initialisierung der gültigen Lösungen überdurchschnittlich viel Zeit im Vergleich zu den

Experimenten mit weniger Aufträgen. Dies kann bei größeren Szenarien jedoch durch eine Heuristik zur Initialisierung der Lösungen behoben werden.

8 Fazit und Ausblick

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, eine Lösung für die Problematik der sinkenden Liefertreue und der dadurch sinkenden Kundenzufriedenheit aufgrund der Einführung von Komplettlieferrungen und Kitting in einer Lean Supply Chain zu erarbeiten. Die Eigenschaften des zugrunde gelegten Liefernetzwerks basieren dabei auf einem realen Szenario eines Lieferanten in der Schienenfahrzeug-Industrie.

Als geeignete adaptive Maßnahme ist ein hybrides Framework für die Integration von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten in komplexen Liefernetzwerken mit multiplen Projekten entwickelt worden. Das Framework basiert auf dem Konzept des hybriden prädiktiv-reaktiven Rescheduling, das zur Behandlung von Störungen – in diesem Fall Verzögerungen bei Lieferungen oder in der Produktion – geeignet ist. Die Grundlage bildet das enthaltene proaktive Verfahren, das vorausschauend Präventivpotenziale zum Abfangen von zukünftigen Störungen aufbaut. Darauf aufsetzend agiert das reaktive Verfahren, das bei Eintritt einer Störung die Auswirkungen derselben minimiert.

Kernelement dieser Arbeit ist das entwickelte proaktive Verfahren zur Steigerung der Liefertreue durch gezielte parallele Planung von Sicherheitsbeständen und Sicherheitszeiten. Aufbauend auf bisher nur getrennt planenden, für das Szenario geeigneten Ansätzen zur Bestimmung von Sicherheitsbeständen oder Sicherheitszeiten, ist ein neues Verfahren zur simultanen Planung beider Sicherheitsmaßnahmen entwickelt worden. Zur Lösung wird eine simulationsbasierte Optimierung mit genetischen Algorithmen eingesetzt. Die genetischen Komponenten sind zur Effizienzsteigerung an die Besonderheiten des betrachteten Liefernetzwerks angepasst. Als Bewertungsfunktion für die Liefertreue dient eine spezifisch für die MRP-Umgebung entwickelte diskrete, eventbasierte Simulation. Diese stellt sicher, dass der MRP-Ablauf korrekt und unter Berücksichtigung von ursprünglich nicht betrachteten Unsicherheiten nachvollzogen wird.

Dem Dilemma der begrenzten Mittel wird durch die Berücksichtigung einer Kapitalbindungsobergrenze und speziellen Auswahlverfahren Rechnung getragen. Die Generierung der Pareto-Menge der Lösungen erfolgt unter der Berücksichtigung der Kapitalbindungsobergrenze. Aus dieser Menge erfolgt eine automatische Auswahl der finalen Lösung hinsichtlich der jeweils auftragsspezifisch erreichten und der vorgegebenen Zielwerte sowie der in der Vergangenheit erreichten Liefertreuwerte. Dazu werden die Methoden des Goal Programming eingesetzt, um anhand taktischer Zielvorgaben zu entscheiden, welche Aufträge besser abgesichert werden und welche Aufträge hinsichtlich der Absicherung vernachlässigt werden. Zusätzlich wurde eine speziell für Mehrzielprobleme geeignete visuelle Auswahloberfläche für die Unterstützung des manuellen Auswahlprozesses entwickelt.

Basierend auf der Implementierung des proaktiven Verfahrens ist anhand mehrerer Evaluationen nachgewiesen, dass das Verfahren geeignet ist, um Sicherheitsbestände und -zeiten zu berechnen, die zu einer signifikanten Steigerung der Liefertreue beitragen.

Um das hybride Framework zu vervollständigen, sind allgemeingültige reaktive Vorgehensweisen definiert worden, die das proaktive Verfahren durch die Ausnutzung des Präventivpotenzials zur weiteren Verbesserung der Liefertreue ergänzen.

Zurzeit ist das entwickelte Konzept aufgrund der Ausnutzung der spezifischen Eigenschaften des Liefernetzwerks auf Komplettlieferungs- und Kitting-Aufträge limitiert. Weiterführende Arbeiten können dementsprechend an der Erweiterung um die Berücksichtigung anderer Auftragstypen ansetzen. Ebenso können erweiterte reaktive Maßnahmen konzipiert und getestet werden. Auch im Bereich der Mehrzieloptimierung bietet sich aufgrund der generischen Konzeption die Integration von neuen Implementierungen genetischer Algorithmen an, um zukünftig komplexere Probleme effizienter lösen zu können. Zusätzlich können weitere Kennzahlen als Ziele definiert und in die Optimierung und die Auswahlverfahren mit aufgenommen werden.

9 Literaturverzeichnis

- [ABH+95] ARNTZEN, Bruce C.; BROWN, Gerald G.; HARRISON, Terry P.; TRAFTON, Linda L.: *Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation*. In: *Interfaces* 25 (1995), Nr. 1, S. 69–93
- [AIK+08] ARNOLD, Dieter; ISERMANN, Heinz; KUHN, Axel; TEMPELMEIER, Horst; FURMANS, Kai: *Handbuch Logistik*. Berlin. Springer, 2008
- [Alic05] ALICKE, Knut: *Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken: Unternehmensübergreifendes Supply-chain-Management*. 2., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin. Springer, 2005 (VDI)
- [Axsä05] AXSÄTER, Sven: *Planning order releases for an assembly system with random operation times*. In: *OR Spectrum* 27 (2005), 2-3, S. 459–470
- [Bade09] BADER, Johannes M.: *Hypervolume-based search for multiobjective optimization: Theory and methods*. Zürich. TIK Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze, ETH Zürich, 2009 (TIK-Schriftenreihe Nr. 112)
- [BFH09] BOULAKSIL, Youssef; FRANSOO, J. C.; HALM, Ernico N. G.: *Setting safety stocks in multi-stage inventory systems under rolling horizon mathematical programming models*. In: *OR Spectrum* 31 (2009), Nr. 1, S. 121–140
- [Bich10] BICHLER, Klaus: *Beschaffungs- und Lagerwirtschaft: Praxisorientierte Darstellung der Grundlagen, Technologien und Verfahren*. 9., aktualisierte und überarb. Aufl. Wiesbaden. Gabler, 2010
- [Bick02] BICKEL, Steffen: *Optimierung von Sicherheitsbeständen in Supply Chains mit Simulation*:2002
- [Blac10] BLACKSTONE, John H.: *APICS dictionary*. 13th ed. (rev.). Chicago, Ill. APICS, 2010
- [BM06] BARTON, Russell R.; MECKESHEIMER, Martin: Metamodel-Based Simulation Optimization, Bd. 13. In: HENDERSON, Shane G.; NELSON, Barry L. (Hrsg.): *Handbook in OR & MS, Vol. 13*. Amsterdam: Elsevier, 2006 // op. 2007
- [BM92] BOZER, Yavuz A.; MCGINNIS, Leon F.: *Kitting versus line stocking: A conceptual framework and a descriptive model*. In: *International Journal of Production Economics* 28 (1992), Nr. 1, S. 1–19
- [BMZ01] BUSACCA, P. Giuggioli; MARSEGUERRA, M.; ZIO, E.: *Multiobjective optimization by genetic algorithms: application to safety systems*. In: *Reliability Engineering & System Safety* 72 (2001), Nr. 1, S. 59–74
- [BNE07] BEUME, Nicola; NAUJOKS, Boris; EMMERICH, Michael: *SMS-EMOA: Multiobjective selection based on dominated hypervolume*. In: *European Journal of Operational Research* 181 (2007), Nr. 3, S. 1653–1669

- [BNR08] BEUME, Nicola; NAUJOKS, Boris; RUDOLPH, Günter: *SMS-EMOA – Effektive evolutionäre Mehrzieloptimierung (SMS-EMOA – Effective Evolutionary Multiobjective Optimization)*. In: *at - Automatisierungstechnik* 56 (2008), 7/2008
- [Bruh10] BRUHN, Manfred: *Marketing: Grundlagen für Studium und Praxis*. 10., überarb. Aufl. Wiesbaden. Gabler, 2010 (Lehrbuch)
- [BS94] BUZACOTT, John A.; SHANTHIKUMAR, J. George: *Safety Stock versus Safety Time in MRP Controlled Production Systems*. In: *Management Science* 40 (1994), Nr. 12, S. 1678–1689
- [CC02] CARIDI, Maria; CIGOLINI, Roberto: *Managing safety and strategic stocks to improve materials requirements planning performance*. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture* 216 (2002), Nr. 7, S. 1061–1065
- [CC05] CHAN, Felix T. S.; CHUNG, Soong. H.: *Multicriterion genetic optimization for due date assigned distribution network problems*. In: *Decision Support Systems* 39 (2005), Nr. 4, S. 661–675
- [CDP09] CHAUHAN, Satyaveer S.; DOLGUI, Alexandre; PROTH, Jean-Marie: *A continuous model for supply planning of assembly systems with stochastic component procurement times*. In: *International Journal of Production Economics* 120 (2009), Nr. 2, S. 411–417
- [CF11] CUYPERE, Eline de; FIEMS, Dieter: Performance Evaluation of a Kitting Process. In: AL-BEGAIN, Khalid; BALSAMO, Simonetta; FIEMS, Dieter (Hrsg.): *Analytical and Stochastic Modeling Techniques and Applications: 18th International Conference, ASMTA 2011, Venice, Italy, June 20-22, 2011. Proceedings*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2011 (Lecture Notes in Computer Science, 6751), S. 175–188
- [CG04] CORSTEN, Daniel; GABRIEL, Christoph: *Supply Chain Management erfolgreich umsetzen: Grundlagen, Realisierung und Fallstudien*. Zweite verbesserte Auflage. Berlin, Heidelberg. Springer, 2004
- [CG06] CORSTEN, Hans; GÖSSINGER, Ralf: Produktionstheoretische Analyse logistischer Leistungserstellungsprozesse. In: JACQUEMIN, Mark; PIBERNIK, Richard; SUCKY, Eric (Hrsg.): *Quantitative Methoden der Logistik und des Supply-Chain-Management: Festschrift für Prof. Dr. Heinz Isermann*. Hamburg: Kovac, 2006 (Logistik-Management in Forschung und Praxis, 11), S. 117–138
- [Chic06] CHICK, E. Stephen: Subjective probability and Bayesian methodology, Bd. 13. In: HENDERSON, Shane G.; NELSON, Barry L. (Hrsg.): *Handbook in OR & MS, Vol. 13*. Amsterdam: Elsevier, 2006 // op. 2007, S. 225–257
- [Chri05] CHRISTOPHER, Martin: *Logistics and supply chain management: Creating value-adding networks*. 3. ed. Harlow. Financial Times Prentice Hall, 2005
- [CLL10] CHEW, Ek P.; LEE, Loo H.; LAU, Yew L.: *Component allocation and ordering policy in a multi-component, multi-product assembled to stock system*. In: *OR Spectrum* 32 (2010), Nr. 2, S. 293–317

- [CLV07] COELLO, Carlos A. Coello; LAMONT, Gary B.; VAN VELDHUIZEN, David A.: *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems: Second Edition*. Boston, MA. Springer Science+Business Media LLC, 2007
- [CMH+02] CHRISTMANSSON, Marita; MEDBO, Lars.; HANSSON, Gert-Åke; OHLSSON, Kers-tina; UNGE BYSTRÖM, Jeannette; MÖLLER, Therése; FORSMAN, Mikael: *A case study of a principally new way of materials kitting—an evaluation of time con-sumption and physical workload*. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 30 (2002), Nr. 1, S. 49–65
- [Coel05] COELLO, Carlos A. Coello: Recent Trends in Evolutionary Multiobjective Opti-mization. In: ABRAHAM, Ajith; GOLDBERG, Robert; JAIN, Lakhmi (Hrsg.): *Evoluti-onary Multiobjective Optimization: Theoretical Advances and Applications*. Lon-don: Springer-Verlag London Limited, 2005 (Advanced Information and Know-ledge Processing), S. 7–32
- [CS60] CLARK, Andrew J.; SCARF, Herbert: *Optimal Policies for a Multi-Echelon Inven-tory Problem*. In: *Management Science* 6 (1960), Nr. 4, S. 475–490
- [DAL+05] DANGELMAIER, Wilhelm; AUFENANGER, Mark; LAROQUE, Christoph; HUBER, Da-niel: d³FACT insight - Ein Materialflusssimulator zum Erstellen und Simulieren komplexer Materialflussmodelle. In: HÜLSEMANN, F.; KOWARSCHIK, M.; RÜDE, U. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th Symposium Simulationstechnique (ASIM 2005): Fortschritte in der Simulationstechnik - Frontiers in Simulation*. Erlangen: SCS European Publishing House, 2005, S. 530–535
- [Dang09] DANGELMAIER, Wilhelm: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [DAV10] DESMET, Bram; AGHEZZAF, El-Houssaine; VANMAELE, Hendrik: *Safety stock opti-misation in two-echelon assembly systems: normal approximation models*. In: *In-ternational Journal of Production Research* 48 (2010), Nr. 19, S. 5767–5781
- [DBX06] DING, Hongwei; BENYOUCEF, Lyès; XIE, Xiaolan: *A simulation-based multi-objec-tive genetic algorithm approach for networked enterprises optimization*. In: *Engi-neering Applications of Artificial Intelligence* 19 (2006), Nr. 6, S. 609–623
- [DD05] DOMSCHKE, Wolfgang; DREXL, Andreas: *Einführung in Operations Research: Mit 63 Tabellen*. 6., überarb. und erw. Aufl. Berlin. Springer, 2005 (Springer-Lehr-buch)
- [Deli13] DELIUS, Robin: *Sicherstellen der Abrufe bei Automotive-Zulieferern mit minimalen Kosten unter besonderer Berücksichtigung von Liquiditäts-, Beschäftigungs-, Knowhow- und IT-Restriktionen*. Paderborn. Universität Paderborn Heinz Nixdorf Inst., 2013 (HNI-Verlagsschriftenreihe 303)
- [DHS03] DOMSCHKE, Wolfgang; HÄSELBARTH, L.; SCHOLL, Armin: *WISU-Lexikon Opera-tions Research*. In: *WISU: das Wirtschaftsstudium* (2003), Nr. 32
- [DIN09] DIN 69901-5:2009-01. *Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe*

- [DML04] DANGELMAIER, Wilhelm; MÜCK, Bengt; LAROQUE, Christoph: d3FACT insight: A Simulation-Tool for multiresolution material flow modells. In: LIPOVSZKY, György; MOLNÁR, István (Hrsg.): *Simulation in industry: 16th European Simulation Symposium*. San Diego: SCS, 2004, S. 17–22
- [DN11] DURILLO, Juan J.; NEBRO, Antonio J.: *jMetal: A Java framework for multi-objective optimization*. In: *Advances in Engineering Software* 42 (2011), Nr. 10, S. 760–771
- [DNA10] DURILLO, Juan J.; NEBRO, Antonio J.; ALBA, Enrique: The jMetal framework for multi-objective optimization: Design and architecture. In: *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2010: 18 - 23 July 2010, Barcelona, Spain ; [part of] 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence (IEEE WCCI 2010)*. Piscataway, NJ: Ieee, 2010, S. 1–8
- [DP07] DOLGUI, Alexandre; PRODHON, Caroline: *Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art*. In: *Annual Reviews in Control* 31 (2007), Nr. 2, S. 269–279
- [DR02] DÍAZ, Ana B. Casado; RUÍZ, Francisco J. Más: *The consumer's reaction to delays in service*. In: *International Journal of Service Industry Management* 13 (2002), Nr. 2, S. 118–140
- [Dreh97] DREHER, Dirk: *Logistik-Benchmarking in der Automobil-Branche: Ein Führungs-instrument zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit*. Lohmar [u.a.]. Eul, 1997 (Reihe: Planung, Organisation und Unternehmungsführung 56)
- [DS05] DOMSCHKE, Wolfgang; SCHOLL, Armin: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht ; mit 79 Tabellen*. 3., verb. Aufl. Berlin. Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch)
- [DW97] DANGELMAIER, Wilhelm; WARNECKE, Hans-Jürgen: *Fertigungslenkung: Planung und Steuerung des Ablaufs der diskreten Fertigung*. Berlin. Springer, 1997
- [EZ12] EHRENBERG, C.; ZIMMERMANN, J.: Simulation-based optimization in make-to-order production: scheduling for a special-purpose glass manufacturer. In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*. Ieee, 2012
- [FG10] FONTES, Dalila B.M.M.; GASPAR-CUNHA, António: On Multi-Objective Evolutionary Algorithms. In: ZOPOUNIDIS, Constantin (Hrsg.): *Handbook of multicriteria analysis*. Heidelberg [u.a.]: Springer, 2010 (Applied optimization), S. 287–310
- [Gebh09] GEBHARD, Marina: *Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit*. Wiesbaden. Gabler, 2009 (Gabler Edition Wissenschaft. Produktion und Logistik)
- [GGR+05] GRABOT, Bernard; GENESTE, Laurent; REYNOSO-CASTILLO, Gabriel; VÉROT, Sophie: *Integration of uncertain and imprecise orders in the MRP method*. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 16 (2005), Nr. 2, S. 215–234
- [GHI+10] GULYASSY, Ferenc; HOPPE, Marc; ISERMANN, Martin; KÖHLER, Oliver: *Materials planning with SAP*. Bonn, Germany, Boston, Mass. Galileo Press/SAP Press, 2010

- [GN06] GIFFFRIDA, Alfred L.; NAGI, Rakesh: *Cost characterizations of supply chain delivery performance*. In: *International Journal of Production Economics* 102 (2006), Nr. 1, S. 22–36
- [Gold89] GOLDBERG, David E.: *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Reading, Mass. Addison-Wesley Pub. Co., 1989
- [GPM04] GUNASEKARAN, Angappa; PATEL, C.; MCGAUGHEY, Ronald E.: *A framework for supply chain performance measurement*. In: *International Journal of Production Economics* 87 (2004), Nr. 3, S. 333–347
- [GR10] GONZÁLEZ-PACHÓN, Jacinto; ROMERO, Carlos: Goal Programming: From Constrained Regression to Bounded Rationality Theories. In: ZOPOUNIDIS, Constantin (Hrsg.): *Handbook of multicriteria analysis*. Heidelberg [u.a.]: Springer, 2010 (Applied optimization), S. 311–328
- [GS00] GUIDE JR, V. Daniel R.; SRIVASTAVA, Rajesh: *A review of techniques for buffering against uncertainty with MRP systems*. In: *Production Planning & Control: The Management of Operations* 11 (2000), Nr. 3, S. 223–233
- [GT12] GÜNTHER, Hans-Otto; TEMPELMEIER, Horst: *Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012 (Springer-Lehrbuch)
- [GT84] GRASSO, Edward T.; TAYLOR, Bernard W., III: *A simulation-based experimental investigation of supply / timing uncertainty in MRP systems*. In: *International Journal of Production Research* 22 (1984), Nr. 3, S. 485–497
- [GT99] GRUBBSTRÖM, Robert W.; TANG, Ou: *Further developments on safety stocks in an MRP system applying Laplace transforms and input — output analysis*. In: *International Journal of Production Economics* 60-61 (1999), S. 381–387
- [Gude10] GUDEHUS, Timm: *Logistik: Grundlagen - Strategien - Anwendungen*. 4., aktualisierte Aufl. Berlin [u.a.]. Springer, 2010
- [Gude12] GUDEHUS, Timm: *Dynamische disposition: Strategien, Algorithmen und Werkzeuge zur optimalen Auftrags-, Bestands- und Fertigungsdisposition*. 3. neu bearbeitete und erweiterte Aufl. Berlin. Springer, 2012
- [GW03] GRAVES, Stephen C.; WILLEMS, Sean P.: Supply Chain Design: Safety Stock Placement and Supply Chain Configuration, Bd. 11. In: BIRGE, John R.; LINETSKY, Vadim (Hrsg.): *Handbook in OR & MS, Vol. 11: Financial engineering*. Amsterdam, Oxford: Elsevier, 2003 // op. 2007, S. 95–132
- [Hans12] HANSON, Robin: *In-plant materials supply: Supporting the choice between kitting and continuous supply*. Gothenburg. Chalmers University of Technology, 2012
- [HDD10] HNAIEN, Faicel; DELORME, Xavier; DOLGUI, Alexandre: *Computers & Operations Research Multi-objective optimization for inventory control in two-level assembly systems under uncertainty of lead times*. In: *Computers & Operations Research* 37 (2010), Nr. 11, S. 1835–1843

- [Hero05] HEROLD, Lothar: *Kundenorientierte Prozesssteuerung in der Automobilindustrie: Die Rolle von Logistik und Logistikcontrolling im Prozess "vom Kunden bis zum Kunden"*. 1. Aufl. Wiesbaden. Dt. Univ.-Verl., 2005
- [Herr06] HERRMANN, Jeffrey W.: Rescheduling Strategies, Policies, and Methods, Bd. 89. In: HERRMANN, Jeffrey W. (Hrsg.): *Handbook of production scheduling*. New York: Springer, 2006 (International series in operations research & management science, 89), S. 135–148
- [HH01] HEGEDUS, Michael G.; HOPP, Wallace J.: *Setting procurement safety lead-times for assembly systems*. In: *International Journal of Production Research* 39 (2001), Nr. 15, S. 3459–3478
- [HHF10] HEDEMAN, Bert.; van Heemst, Gabor Vis; FREDRIKSZ, Hans: *Project Management Based on PRINCE2 2009*. Bernan Assoc, 2010
- [HN06] HENDERSON, Shane G.; NELSON, Barry L.: Stochastic Computer Simulation, Bd. 13. In: HENDERSON, Shane G.; NELSON, Barry L. (Hrsg.): *Handbook in OR & MS, Vol. 13*. Amsterdam: Elsevier, 2006 // op. 2007, S. 1–18
- [HN09] HONG, L. Jeff; NELSON, Barry L.: A brief introduction to optimization via simulation. In: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. Piscataway: Ieee, 2009, S. 75–85
- [Hoek01] VAN HOEK, Remko I.: *The contribution of performance measurement to the expansion of third party logistics alliances in the supply chain*. In: *International Journal of Operations & Production Management* 21 (2001), 1/2, S. 15–29
- [Holl00] HOLLAND, John H.: *Building Blocks, Cohort Genetic Algorithms, and Hyperplane-Defined Functions*. In: *Evolutionary Computation* 8 (2000), Nr. 4, S. 373–391
- [Hopp08] HOPPE, Marc: *Bestandsoptimierung mit SAP: Effektives Bestandsmanagement mit SAP ERP und SAP SCM*. 2. Aufl. Bonn, Boston, Mass. Galileo Press, 2008
- [HP04] HALL, Nicholas G.; POTTS, Chris N.: *Rescheduling for New Orders*. In: *Operations Research* 52 (2004), Nr. 3, S. 440–453
- [HS10] HVOLBY, Hans-Henrik; STEGER-JENSEN, Kenn: *Technical and industrial issues of Advanced Planning and Scheduling (APS) systems*. In: *Computers in Industry* 61 (2010), Nr. 9, S. 845–851
- [HW11] HUMAIR, Salal; WILLEMS, Sean P.: *Optimizing Strategic Safety Stock Placement in General Acyclic Networks*. In: *Operations Research* 59 (2011), Nr. 3, S. 781–787
- [ICZ+13] IDOWU, Samuel O.; CAPALDI, Nicholas; ZU, Liangrong; GUPTA, Ananda Das: *Encyclopedia of Corporate Social Responsibility*. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [Ilie07] ILIEV, Nikolai: *Flexibilität in Rahmenverträgen: Ansatz zur standardisierten Ausgestaltung und Risikobeherrschung für das Materialmanagement*. 1. Aufl. Wiesbaden. Deutscher Universitäts-Verlag, 2007 (Gabler Edition Wissenschaft)

- [IM98] INDERFURTH, Karl; MINNER, Stefan: *Safety stocks in multi-stage inventory systems under different service measures*. In: *European Journal of Operational Research* 106 (1998), Nr. 1, S. 57–73
- [Inde09] INDERFURTH, Karl: *How to protect against demand and yield risks in MRP systems*. In: *International Journal of Production Economics* 121 (2009), Nr. 2, S. 474–481
- [IV13] INDERFURTH, Karl; VOGELGESANG, Stephanie: *Concepts for safety stock determination under stochastic demand and different types of random production yield*. In: *European Journal of Operational Research* 224 (2013), Nr. 2, S. 293–301
- [JBP+08] JUNG, June Young; BLAU, Gary; PEKNY, Joseph F.; REKLAITIS, Gintaras V.; EVERSDYK, David: *Integrated safety stock management for multi-stage supply chains under production capacity constraints*. In: *Computers & Chemical Engineering* 32 (2008), Nr. 11, S. 2570–2581
- [JC09] JAIMES, López Antonio; COELLO, Carlos A. Coello: Some techniques to deal with many-objective problems. In: ROTHLAUF, Franz (Hrsg.): *Proceedings of the 11th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation Conference Late Breaking Papers: Late Breaking Papers*. New York, NY: ACM, 2009, S. 2693–2696
- [Jens96] JENSEN, Thomas: *Planungsstabilität in der Material-Logistik*. Heidelberg. Physica-Verl., 1996 (Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre Bd. 10)
- [KDZ10] VAN KAMPEN, Tim J.; VAN DONK, Dirk Pieter; VAN DER ZEE, Durk-Jouke: *Safety stock or safety lead time: coping with unreliability in demand and supply*. In: *International Journal of Production Research* 48 (2010), Nr. 24, S. 7463–7481
- [KGS07] KOH, Siau Ching Lenny; GUNASEKARAN, Angappa.; SAAD, Sameh M.: *Tackling uncertainty in ERP-controlled manufacturing environment: A knowledge management approach*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 31 (2007), 7-8, S. 833–840
- [KGS10] KANET, John J.; GORMAN, Michael F.; STOSSLEIN, Martin: *Dynamic planned safety stocks in supply networks*. In: *International Journal of Production Research* 48 (2010), Nr. 22, S. 6859–6880
- [KH02] KUHN, Axel; HELLINGRATH, Bernd: *Supply-chain-Management: Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette*. Berlin. Springer, 2002 (Engineering online library)
- [KHP+11] KLÖPPER, Benjamin; HONIDEN, Shinichi; PATER, Jan-Patrick; DANGELMAIER, Wilhelm: Decision making in adaptive manufacturing systems: Multi-objective scheduling and user interface. In: *Computational Intelligence in Control and Automation CICA: IEEE Symposium on*: Ieee, 2011, S. 123–130
- [KJF10] KUSTER, Jürgen; JANNACH, Dietmar; FRIEDRICH, Gerhard: *Applying Local Rescheduling in response to schedule disruptions*. In: *Annals of Operations Research* 180 (2010), Nr. 1, S. 265–282

- [Klos10] KLOSTERHALFEN S A MINNER, S. B.: *Safety stock optimisation in distribution systems: A comparison of two competing approaches*. In: *International Journal of Logistics Research and Applications* 13 (2010), Nr. 2, S. 99–120
- [Koet12] KOETHER, Reinhard: *Distributionslogistik*. Wiesbaden. Gabler Verlag, 2012
- [Kohn05] KOHN, Wolfgang: *Statistik: Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Berlin [u.a.]. Springer, 2005 (Statistik und ihre Anwendungen)
- [Koli01] KOLISCH, Rainer: *Make-to-order assembly management*. Berlin. Springer, 2001
- [KR11] KRUG, Wilfried; ROSE, Oliver: Optimierung. In: MÄRZ, Lothar; KRUG, Wilfried; ROSE, Oliver; WEIGERT, Gerald (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 21–28
- [Krüg04] KRÜGER, Rolf: *Das Just-in-time-Konzept für globale Logistikprozesse*. 1. Aufl. Wiesbaden. Dt. Univ.-Verl, 2004 (Gabler Edition Wissenschaft: Supply-chain-Management)
- [KS03] KOH, Siau Ching Lenny; SAAD, Sameh M.: *MRP-controlled manufacturing environment disturbed by uncertainty*. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 19 (2003), 1-2, S. 157–171
- [KS04] KOH, Siau Ching Lenny; SAAD, Sameh M.: *Modelling uncertainty under a multi-echelon ERP-controlled manufacturing system*. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 15 (2004), Nr. 3, S. 239–253
- [KS06] KOH, Siau Ching Lenny; SAAD, Sameh M.: *Managing uncertainty in ERP-controlled manufacturing environments in SMEs*. In: *International Journal of Production Economics* 101 (2006), Nr. 1, S. 109–127
- [KS08] KROG, Ernst-Hermann; STATKEVICH, Katsiaryna: Kundenorientierung und Integrationsfunktion der Logistik in der Supply Chain der Automobilindustrie. In: BAUMGARTEN, Helmut (Hrsg.): *Das Beste der Logistik: Innovationen, Strategien, Umsetzungen*. Berlin: Springer, 2008, S. 185–195
- [KS11] KLEIN, Robert; SCHOLL, Armin: *Planung und Entscheidung: Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*. 2. Aufl. München. Vahlen, Franz, 2011 (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)
- [KSJ02] KOH, Siau Ching Lenny; SAAD, Sameh M.; JONES, M. H.: *Uncertainty under MRP-planned manufacture: Review and categorization*. In: *International Journal of Production Research* 40 (2002), Nr. 10, S. 2399–2421
- [KSL06] KOH, Siau Ching Lenny; SIMPSON, Mike; LIN, Yuanxin: *Uncertainty and contingency plans in ERP-controlled manufacturing environments*. In: *Journal of Enterprise Information Management* 19 (2006), Nr. 6, S. 625–645
- [Larg08] LARGE, Rudolf: *Strategisches Beschaffungsmanagement: Eine praxisorientierte Einführung. Mit Fallstudien*. 4., aktualis. Aufl. Wiesbaden. Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, 2008 (Lehrbuch)

- [Law14] LAW, Averill M.: *Simulation modeling and analysis*. Fifth edition, 2014 (McGraw-Hill series in industrial engineering and management science)
- [LB92] LEE, Hau L.; BILLINGTON, Corey: *Managing supply chain inventory: pitfalls and opportunities*. In: *Sloan management review* 33 (1992), Nr. 3, S. 65–73
- [LD09] LOULY, Mohamed-Aly; DOLGUI, Alexandre: *Calculating safety stocks for assembly systems with random component procurement lead times: A branch and bound algorithm*. In: *European Journal of Operational Research* 199 (2009), Nr. 3, S. 723–731
- [LD11] LOULY, Mohamed-Aly; DOLGUI, Alexandre: *Optimal MRP parameters for a single item inventory with random replenishment lead time, POQ policy and service level constraint*. In: *International Journal of Production Economics* (2011)
- [LDH08] LOULY, Mohamed-Aly; DOLGUI, Alexandre; HNAIEN, Faicel: *Supply planning for single-level assembly system with stochastic component delivery times and service-level constraint*. In: *International Journal of Production Economics* 115 (2008), Nr. 1, S. 236–247
- [Limè11] LIMÈRE, Veronique: *To kit or not to kit: optimizing part feeding in the automotive assembly industry*. Ghent. Ghent University. Faculty of Engineering and Architecture, 2011
- [Litk07] LITKE, Hans-Dieter: *Projektmanagement: Methoden, Techniken, Verhaltensweisen, evolutionäres Projektmanagement*. 5., erw. Aufl. München. Hanser, 2007
- [Lödd05] LÖDDING, Hermann: *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. Berlin, Heidelberg, New York. Springer, 2005 (VDI)
- [LYL+13] LI, Miqing; Yang Shengxiang; LIU, Xiaohui; SHEN, Ruimin: A Comparative Study on Evolutionary Algorithms for Many-Objective Optimization. In: PURSHOUSE, Robin C. (Hrsg.): *Evolutionary multi-criterion optimization: 7th International Conference, EMO 2013, Sheffield, UK, March 19-22, 2013. Proceedings*. Berlin, New York: Springer, 2013 (LNCS sublibrary. SL 1, Theoretical computer science and general issues, 7811).
- [März02] MÄRZ, Lothar: *Ein Planungsverfahren zur Konfiguration der Produktionslogistik*. Heimsheim. Jost-Jetter Verlag, 2002 (IPA-IAO Forschung und Praxis)
- [MBK12] MEFFERT, Heribert; BURMANN, Christoph; KIRCHGEORG, Manfred: *Marketing: Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung*. 11., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden. Gabler Verlag, 2012 (Meffert-Marketing-Edition)
- [Medb03] MEDBO, Lars: *Assembly work execution and materials kit functionality in parallel flow assembly systems*. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 31 (2003), Nr. 4, S. 263–281
- [Melz07] MELZER-RIDINGER, Ruth: *Supply Chain Management: Prozess- und unternehmensübergreifendes Management von Qualität, Kosten und Liefertreue*. München [u.a.]. Oldenbourg, 2007

- [MK11] MÄRZ, Lothar; KRUG, Wilfried: Kopplung von Simulation und Optimierung. In: MÄRZ, Lothar; KRUG, Wilfried; ROSE, Oliver; WEIGERT, Gerald (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 41–46
- [Moli97] MOLINDER, Anders: *Joint optimization of lot-sizes , safety stocks and safety lead times in an MRP system*. In: *International Journal of Production Research* 35 (1997), Nr. 4, S. 983–994
- [MPG+06] MULA, Josefa; POLER, Raul; GARCÍA-SABATER, Jose P.; LARIO, Francisco C.: *Models for production planning under uncertainty: A review*. In: *International Journal of Production Economics* 103 (2006), Nr. 1, S. 271–285
- [MS09] MELLOULI, Taieb; SUHL, Leena: *Optimierungssysteme*. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [MS10] MUCKSTADT, John A.; SAPRA, Amar: *Principles of Inventory Management*. New York, NY. Springer New York, 2010
- [MZ13] MONCAYO-MARTÍNEZ, Luis A.; ZHANG, David Z.: *Optimising safety stock placement and lead time in an assembly supply chain using bi-objective MAX-MIN ant system*. In: *International Journal of Production Economics* (2013)
- [Neun09] NEUNER, Christian: *Konfiguration internationaler Produktionsnetzwerke unter Berücksichtigung von Unsicherheit*. 1. Aufl. Wiesbaden. Gabler, 2009 (Gabler Research: Schriften zum europäischen Management)
- [NNS10] NIELSEN, Peter; NIELSEN, Izabela; STEGER-JENSEN, Kenn: *Analyzing and evaluating product demand interdependencies*. In: *Computers in Industry* 61 (2010), Nr. 9, S. 869–876
- [OD12] OSMAN, Hany; DEMIRLI, Kudret: *Integrated safety stock optimization for multiple sourced stockpoints facing variable demand and lead time*. In: *International Journal of Production Economics* 135 (2012), Nr. 1, S. 299–307
- [Ólaf06] ÓLAFSSON, Sigurdur: Metaheuristics, Bd. 13. In: HENDERSON, Shane G.; NELSON, Barry L. (Hrsg.): *Handbook in OR & MS, Vol. 13*. Amsterdam: Elsevier, 2006 // op. 2007, S. 633–654
- [OYS03] OKABE, Tatsuya.; Yaochu Jin; SENDHOFF, Bernhard: A critical survey of performance indices for multi-objective optimisation. In: *Evolutionary Computation, 2003. CEC '03. The 2003 Congress on*, 2003, S. 878–885
- [PBM+07] PERSONA, Alessandro; BATTINI, Daria; MANZINI, Riccardo; PARESCHI, Arrigo: *Optimal safety stock levels of subassemblies and manufacturing components*. In: *International Journal of Production Economics* 110 (2007), 1-2, S. 147–159
- [Pföh10] PFOHL, Hans-Christian: *Logistiksysteme*. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [RD05] RAMACHANDRAN, Satheesh; DELEN, Dursun: *Performance analysis of a kitting process in stochastic assembly systems*. In: *Computers & Operations Research* 32 (2005), Nr. 3, S. 449–463

- [RM11] ROSE, Oliver; MÄRZ, Lothar: Simulation. In: MÄRZ, Lothar; KRUG, Wilfried; ROSE, Oliver; WEIGERT, Gerald (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 13–20
- [RU11] RÖSSLER, Irene; UNGERER, Albrecht: *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler*. Heidelberg. Physica-Verlag HD, 2011
- [SAD+08] SITOMPUL, Carles; AGHEZZAF, El-Houssaine; DULLAERT, Wout; VAN LANDEGHEM, Hendrik: *Safety Stock Placement in Capacitated Supply Chains*. In: *International Journal of Production Research* 46 (2008), Nr. 17, S. 4709–4727
- [SAP13a-ol] SAP AG: *Planauftrag*. URL http://help.sap.com/saphelp_46c/helpdata/de/f4/7d30ef44af11d182b40000e829fbfe/content.htm – Überprüfungsdatum 2013-09-10
- [SAP13b-ol] SAP AG: *Umsetzung von Planaufträgen*. URL http://help.sap.com/saphelp_erp60_sp/helpdata/de/b1/c040e1439a11d189410000e829fbdb/content.htm – Überprüfungsdatum 2013-09-10
- [SAP13c-ol] SAP AG: *Umsetzen von Planaufträgen in Fertigungsaufträge*. URL http://help.sap.com/saphelp_45b/helpdata/de/f4/7d31e644af11d182b40000e829fbfe/content.htm – Überprüfungsdatum 2013-09-10
- [SAP13d-ol] SAP AG: *Umsetzbarkeit von Planaufträgen*. URL http://help.sap.com/saphelp_apo31/helpdata/de/87/04f73b8003b409e10000000a114084/content.htm – Überprüfungsdatum 2013-09-10
- [SAP13e-ol] SAP AG: *Umlagerung von Werk an Werk*. URL http://help.sap.com/saphelp_46c/helpdata/DE/f4/7d2d5a44af11d182b40000e829fbfe/content.htm – Überprüfungsdatum 2013-09-10
- [SAP13f-ol] SAP Help Portal: *Logistische Zusatzleistung (LZL)*. URL http://help.sap.com/erp_hcm_ias_2013_01/helpdata/de/34/89f0a0329e3d4585900e4ff9cd3ddc/content.htm. – Aktualisierungsdatum: 2013-01-19 – Überprüfungsdatum 2013-08-07
- [SB98] SMITH, Amy. K.; BOLTON, Ruth N.: *An Experimental Investigation of Customer Reactions to Service Failure and Recovery Encounters: Paradox or Peril?* In: *Journal of Service Research* 1 (1998), Nr. 1, S. 65–81
- [Schn92] SCHNEEWEIß, Christoph: *Konzepte der Prozeß- und Modellgestaltung*. Berlin [u.a.]. Springer, 1992 (Planung 2)
- [Scho01] SCHOLL, Armin: *Robuste Planung und Optimierung: Grundlagen - Konzepte und Methoden - experimentelle Untersuchungen ; mit 105 Tabellen*. Heidelberg. Physica-Verl., 2001
- [Schö11] SCHÖNSLEBEN, Paul: *Integrales Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2011

- [Schr70] SCHRÖDER, Harald Jürgen: *Projekt-Management: Eine Führungskonzeption zur Durchführung außergewöhnlicher Vorhaben im Rahmen des normalen Betriebsgeschehens*. Wiesbaden: Gabler, 1970
- [SF10] SCHRÖDER, Michael; FRANCA, David: *Mehrstufige Bestandsoptimierung: Potenzielle und Erfolgsfaktoren für die Praxis*. In: Tagungsband zum 27. Deutschen Logistik-Kongress 2010 (2010)
- [SFZ12] SAKIANI, Reza; Fatemi Ghomi, Seyyed M. T.; ZANDIEH, Mostafa: *Multi-objective supply planning for two-level assembly systems with stochastic lead times*. In: *Computers & Operations Research* 39 (2012), Nr. 7, S. 1325–1332
- [SHN12] SCHMIDT, Matthias; HARTMANN, Wiebke; NYHUIS, Peter: *Simulation based comparison of safety-stock calculation methods*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012), Nr. 1, S. 403–406
- [SHS12] SIMANGUNSONG, Eliot; HENDRY, Linda C.; STEVENSON, Mark: *Supply-chain uncertainty: A review and theoretical foundation for future research*. In: *International Journal of Production Research* 50 (2012), Nr. 16, S. 4493–4523
- [Simp58] SIMPSON, Kenneth F.: *In-Process Inventories*. In: *Operations Research* 6 (1958), Nr. 6, S. 863–873
- [SK05] STADTLER, Hartmut; KILGER, Christoph: *Supply chain management and advanced planning: Concepts, models, software and case studies; with 56 tables*. 3. ed. Berlin: Springer, 2005
- [SSE06] SCHULZE, Manuel; SEURING, Stefan; EWERING, Christian: Build-to-order Supply Chain Management: Anwendungsbedingungen und Fallbeispiel. In: DANGELMAIER, Wilhelm (Hrsg.): *Die Supply Chain von morgen - Lieferfähigkeit im globalen Unternehmen*. Paderborn: Fraunhofer-Anwendungszentrum Logistikorientierte Betriebswirtschaft, 2006 (ALB-HNI-Verlagsschriftenreihe Innovative Produktion und Logistik, Bd. 14), S. 1–10
- [Stad05] STADTLER, Hartmut: *Supply chain management and advanced planning - basics, overview and challenges*. In: *European Journal of Operational Research* 163 (2005), Nr. 3, S. 575–588
- [SZ05] SIMCHI-LEVI, David; ZHAO, Yao: *Safety stock positioning in supply chains with stochastic lead times*. In: *Manufacturing & Service Operations Management* 7 (2005), Nr. 4, S. 295–318
- [Talb09] TALBI, El-Ghazali: *Metaheuristics: From design to implementation*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2009
- [TDH09] THUN, Jörn-Henrik; DRÜKE, Martin; HOENIG, Daniel: Fehlteilmanagement als Herausforderung für Industriebetriebe. In: STROHHECKER, Jürgen; GRÖSSLER, Andreas (Hrsg.): *Strategisches und operatives Produktionsmanagement: Empirie und Simulation*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2009 (Gabler Research), S. 167–184

- [Temp06a] TEMPELMEIER, Horst: *Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen*. 6., neubearbeitete Aufl. Berlin. Springer, 2006
- [Temp06b] TEMPELMEIER, Horst: *Bestandsmanagement in Supply Chains*. 2. Aufl. Nor-derstedt. Books on Demand, 2006
- [TG03] TANG, Ou; GRUBBSTRÖM, Robert W.: *The detailed coordination problem in a two-level assembly system with stochastic lead times*. In: *International Journal of Production Economics* 81-82 (2003), S. 415–429
- [Thon10] THONEMANN, Ulrich: *Operations Management: Konzepte, Methoden und Anwendungen*. Pearson Deutschland GmbH, 2010
- [TKL05] TAN, Kay C.; KHOR, Eik F.; LEE, Tong H.: *Multiobjective Evolutionary Algorithms and Applications*. London. Springer London, 2005 (Advanced Information and Knowledge Processing)
- [ÜR10] ÜNLÜ, Yasin; ROSSETTI, Manuel D.: Safety Stock Adjustments to Meet Desired Service Level Requirements. In: JOHNSON, A.; MILLER, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 2010 Industrial Engineering Research Conference*, 2010
- [VDA07] VDA: *Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette: Produktherstellung und -lieferung: Robuster Produktionsprozess*. 1. Aufl. Oberursel. VDA Qualitäts-Management-Center (QMC), 2007 (Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie)
- [VDI3633] VDI 3633: Blatt 1. *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen: Grundlagen*
- [VHL03] VIEIRA, Guilherme E.; HERRMANN, Jeffrey W.; LIN, Edward: *Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies, and Methods*. In: *Journal of Scheduling* 6 (2003), Nr. 1, S. 39–62
- [Wann10] WANNENWETSCH, Helmut: *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik*. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [WW76] WHYBARK, D. Clay; WILLIAMS, J. Gregg: *Material requirements planning under uncertainty*. In: *Decision Sciences* 7 (1976), Nr. 4, S. 595–606
- [XZC12] XU, Xin; ZHAO, Yao; CHEN, Ching-yu: *Project-driven supply chains: integrating safety-stock and crashing decisions for recurrent projects*. In: *Annals of Operations Research* (2012)
- [Zell13] ZELL, Helmut: *Projektmanagement*. [S.l.]. Books on Demand, 2013
- [ZLT02] ZITZLER, Eckart; LAUMANNS, Marco; THIELE, Lothar: SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm For Multiobjective Optimization. In: GI-ANNAKOGLOU, K. C. (Hrsg.): *Evolutionary methods for design, optimization and control with applications to industrial problems: Proceedings of the EURO-GEN2001Conference, Athens, Greece, September 19-21, 2001*. Barcelona: CIMNE, 2002, S. 95–100

-
- [Zopo10] ZOPOUNIDIS, Constantin (Hrsg.): *Handbook of multicriteria analysis*. Heidelberg [u.a.]. Springer, 2010 (Applied optimization)
 - [ZPR11] ZAPATA, Juan Camilo; PEKNY, Joesph; REKLAITIS, Gintaras V.: Simulation-Optimization in Support of Tactical and Strategic Enterprise Decisions. In: KEMPF, Karl G.; KESKINOCAK, Pinar; UZSOY, Reha (Hrsg.): *Planning production and inventories in the extended enterprise: A state of the art handbook*. New York, NY [u.a.]: Springer, 2011 (International series in operations research management science, 151), S. 593–627
 - [ZS06] ZÄPFEL, Günther; STRACK, Gerhard: Heterarchische Plankoordination von Liefernetzwerken durch ein agentenbasiertes Modell. In: JACQUEMIN, Mark; PIBERNIK, Richard; SUCKY, Eric (Hrsg.): *Quantitative Methoden der Logistik und des Supply-Chain-Management: Festschrift für Prof. Dr. Heinz Isermann*. Hamburg: Kovac, 2006 (Logistik-Management in Forschung und Praxis, 11), S. 41–64
 - [Zsch07] ZSCHORN, Lars: *Quantifizierung von Unsicherheiten in auftragsbezogenen Produktionsnetzen*. 2007

10 Anhang

10.1 Auswertungsszenario

Tabelle 10.1: Generierte Planaufträge mit 10 Kundenaufträgen

Nr	Typ	Menge	Material	Start	Ende	Quelle	Ziel	Vorgänger	Nachfolger
1	UL_BE	2	A1	08.06.2014	09.06.2014	A_WA	B1_WA	2	
2	FE_AU	2	A1	06.06.2014	08.06.2014	A_WE	A_WA	3	1
3	BE_AN	2	AM1	05.06.2014	06.06.2014	L4	A_WE		1 2
4	FE_AU	1	B1_1	06.06.2014	09.06.2014	B1_WE	B1_WA	5 6 7	
5	BE_AN	1	BM3	04.06.2014	06.06.2014	L3	B1_WE		4
6	BE_AN	1	BM1	05.06.2014	06.06.2014	L3	B1_WE		4
7	BE_AN	1	BM2	02.06.2014	06.06.2014	L3	B1_WE		4
8	UL_BE	2	B2_1	08.06.2014	09.06.2014	B2_WA	B1_WA	9	
9	FE_AU	2	B2_1	06.06.2014	08.06.2014	B2_WE	B2_WA	10	8
10	UL_BE	2	B1_K1	05.06.2014	06.06.2014	B1_WA	B2_WE	11	8 9
11	FE_AU	2	B1_K1	01.06.2014	05.06.2014	B1_WE	B1_WA	12 13	8 9 10
12	BE_AN	2	BM1	31.05.2014	01.06.2014	L3	B1_WE		8 9 10 11
13	BE_AN	4	BM2	28.05.2014	01.06.2014	L3	B1_WE		8 9 10 11
14	UL_BE	1	C2	08.06.2014	09.06.2014	C_WA	B1_WA	15	
15	FE_AU	1	C2	06.06.2014	08.06.2014	C_WE	C_WA	16 17	14
16	BE_AN	1	CM1	05.06.2014	06.06.2014	L1	C_WE		14 15
17	BE_AN	4	CM2	03.06.2014	06.06.2014	L1	C_WE		14 15
18	UL_BE	2	A2	09.06.2014	10.06.2014	A_WA	B1_WA	19	
19	FE_AU	2	A2	06.06.2014	09.06.2014	A_WE	A_WA	20	18
20	BE_AN	2	AM2	03.06.2014	06.06.2014	L4	A_WE		18 19
21	UL_BE	3	B2_2	09.06.2014	10.06.2014	B2_WA	B1_WA	22	
22	FE_AU	3	B2_2	06.06.2014	09.06.2014	B2_WE	B2_WA	23 24	21
23	BE_AN	3	BM1	05.06.2014	06.06.2014	L3	B2_WE		21 22
24	UL_BE	3	B1_K2	05.06.2014	06.06.2014	B1_WA	B2_WE	25	21 22
25	FE_AU	3	B1_K2	03.06.2014	05.06.2014	B1_WE	B1_WA	26 27	21 22 24
26	BE_AN	6	BM3	01.06.2014	03.06.2014	L3	B1_WE		21 22 24 25
27	BE_AN	3	BM2	30.05.2014	03.06.2014	L3	B1_WE		21 22 24 25
28	UL_BE	2	A1	15.06.2014	16.06.2014	A_WA	B1_WA	29	
29	FE_AU	2	A1	13.06.2014	15.06.2014	A_WE	A_WA	30	28
30	BE_AN	2	AM1	12.06.2014	13.06.2014	L4	A_WE		28 29
31	FE_AU	1	B1_1	13.06.2014	16.06.2014	B1_WE	B1_WA	32 33 34	
32	BE_AN	1	BM3	11.06.2014	13.06.2014	L3	B1_WE		31
33	BE_AN	1	BM1	12.06.2014	13.06.2014	L3	B1_WE		31
34	BE_AN	1	BM2	09.06.2014	13.06.2014	L3	B1_WE		31
35	UL_BE	2	B2_1	15.06.2014	16.06.2014	B2_WA	B1_WA	36	
36	FE_AU	2	B2_1	13.06.2014	15.06.2014	B2_WE	B2_WA	37	35
37	UL_BE	2	B1_K1	12.06.2014	13.06.2014	B1_WA	B2_WE	38	35 36
38	FE_AU	2	B1_K1	08.06.2014	12.06.2014	B1_WE	B1_WA	39 40	35 36 37
39	BE_AN	2	BM1	07.06.2014	08.06.2014	L3	B1_WE		35 36 37 38
40	BE_AN	4	BM2	04.06.2014	08.06.2014	L3	B1_WE		35 36 37 38
41	UL_BE	1	C2	15.06.2014	16.06.2014	C_WA	B1_WA	42	
42	FE_AU	1	C2	13.06.2014	15.06.2014	C_WE	C_WA	43 44	41
43	BE_AN	1	CM1	12.06.2014	13.06.2014	L1	C_WE		41 42
44	BE_AN	4	CM2	10.06.2014	13.06.2014	L1	C_WE		41 42
45	UL_BE	2	A2	16.06.2014	17.06.2014	A_WA	B1_WA	46	

Nr	Typ	Menge	Material	Start	Ende	Quelle	Ziel	Vorgänger	Nachfolger
46	FE_AU	2	A2	13.06.2014	16.06.2014	A_WE	A_WA	47	45
47	BE_AN	2	AM2	10.06.2014	13.06.2014	L4	A_WE		45 46
48	UL_BE	3	B2_2	16.06.2014	17.06.2014	B2_WA	B1_WA	49	
49	FE_AU	3	B2_2	13.06.2014	16.06.2014	B2_WE	B2_WA	50 51	48
50	BE_AN	3	BM1	12.06.2014	13.06.2014	L3	B2_WE		48 49
51	UL_BE	3	B1_K2	12.06.2014	13.06.2014	B1_WA	B2_WE	52	48 49
52	FE_AU	3	B1_K2	10.06.2014	12.06.2014	B1_WE	B1_WA	53 54	48 49 51
53	BE_AN	6	BM3	08.06.2014	10.06.2014	L3	B1_WE		48 49 51 52
54	BE_AN	3	BM2	06.06.2014	10.06.2014	L3	B1_WE		48 49 51 52
55	UL_BE	2	A1	22.06.2014	23.06.2014	A_WA	B1_WA	56	
56	FE_AU	2	A1	20.06.2014	22.06.2014	A_WE	A_WA	57	55
57	BE_AN	2	AM1	19.06.2014	20.06.2014	L4	A_WE		55 56
58	FE_AU	1	B1_1	20.06.2014	23.06.2014	B1_WE	B1_WA	59 60 61	
59	BE_AN	1	BM3	18.06.2014	20.06.2014	L3	B1_WE		58
60	BE_AN	1	BM1	19.06.2014	20.06.2014	L3	B1_WE		58
61	BE_AN	1	BM2	16.06.2014	20.06.2014	L3	B1_WE		58
62	UL_BE	2	B2_1	22.06.2014	23.06.2014	B2_WA	B1_WA	63	
63	FE_AU	2	B2_1	20.06.2014	22.06.2014	B2_WE	B2_WA	64	62
64	UL_BE	2	B1_K1	19.06.2014	20.06.2014	B1_WA	B2_WE	65	62 63
65	FE_AU	2	B1_K1	15.06.2014	19.06.2014	B1_WE	B1_WA	66 67	62 63 64
66	BE_AN	2	BM1	14.06.2014	15.06.2014	L3	B1_WE		62 63 64 65
67	BE_AN	4	BM2	11.06.2014	15.06.2014	L3	B1_WE		62 63 64 65
68	UL_BE	1	C2	22.06.2014	23.06.2014	C_WA	B1_WA	69	
69	FE_AU	1	C2	20.06.2014	22.06.2014	C_WE	C_WA	70 71	68
70	BE_AN	1	CM1	19.06.2014	20.06.2014	L1	C_WE		68 69
71	BE_AN	4	CM2	17.06.2014	20.06.2014	L1	C_WE		68 69
72	UL_BE	2	A2	23.06.2014	24.06.2014	A_WA	B1_WA	73	
73	FE_AU	2	A2	20.06.2014	23.06.2014	A_WE	A_WA	74	72
74	BE_AN	2	AM2	17.06.2014	20.06.2014	L4	A_WE		72 73
75	UL_BE	3	B2_2	23.06.2014	24.06.2014	B2_WA	B1_WA	76	
76	FE_AU	3	B2_2	20.06.2014	23.06.2014	B2_WE	B2_WA	77 78	75
77	BE_AN	3	BM1	19.06.2014	20.06.2014	L3	B2_WE		75 76
78	UL_BE	3	B1_K2	19.06.2014	20.06.2014	B1_WA	B2_WE	79	75 76
79	FE_AU	3	B1_K2	17.06.2014	19.06.2014	B1_WE	B1_WA	80 81	75 76 78
80	BE_AN	6	BM3	15.06.2014	17.06.2014	L3	B1_WE		75 76 78 79
81	BE_AN	3	BM2	13.06.2014	17.06.2014	L3	B1_WE		75 76 78 79
82	UL_BE	2	A1	29.06.2014	30.06.2014	A_WA	B1_WA	83	
83	FE_AU	2	A1	27.06.2014	29.06.2014	A_WE	A_WA	84	82
84	BE_AN	2	AM1	26.06.2014	27.06.2014	L4	A_WE		82 83
85	FE_AU	1	B1_1	27.06.2014	30.06.2014	B1_WE	B1_WA	86 87 88	
86	BE_AN	1	BM3	25.06.2014	27.06.2014	L3	B1_WE		85
87	BE_AN	1	BM1	26.06.2014	27.06.2014	L3	B1_WE		85
88	BE_AN	1	BM2	23.06.2014	27.06.2014	L3	B1_WE		85
89	UL_BE	2	B2_1	29.06.2014	30.06.2014	B2_WA	B1_WA	90	
90	FE_AU	2	B2_1	27.06.2014	29.06.2014	B2_WE	B2_WA	91	89
91	UL_BE	2	B1_K1	26.06.2014	27.06.2014	B1_WA	B2_WE	92	89 90
92	FE_AU	2	B1_K1	22.06.2014	26.06.2014	B1_WE	B1_WA	93 94	89 90 91
93	BE_AN	2	BM1	21.06.2014	22.06.2014	L3	B1_WE		89 90 91 92
94	BE_AN	4	BM2	18.06.2014	22.06.2014	L3	B1_WE		89 90 91 92
95	UL_BE	1	C2	29.06.2014	30.06.2014	C_WA	B1_WA	96	
96	FE_AU	1	C2	27.06.2014	29.06.2014	C_WE	C_WA	97 98	95
97	BE_AN	1	CM1	26.06.2014	27.06.2014	L1	C_WE		95 96
98	BE_AN	4	CM2	24.06.2014	27.06.2014	L1	C_WE		95 96
99	UL_BE	2	A2	30.06.2014	01.07.2014	A_WA	B1_WA	100	
100	FE_AU	2	A2	27.06.2014	30.06.2014	A_WE	A_WA	101	99

Nr	Typ	Menge	Material	Start	Ende	Quelle	Ziel	Vorgänger	Nachfolger
101	BE_AN	2	AM2	24.06.2014	27.06.2014	L4	A_WE		99 100
102	UL_BE	3	B2_2	30.06.2014	01.07.2014	B2_WA	B1_WA	103	
103	FE_AU	3	B2_2	27.06.2014	30.06.2014	B2_WE	B2_WA	104 105	102
104	BE_AN	3	BM1	26.06.2014	27.06.2014	L3	B2_WE		102 103
105	UL_BE	3	B1_K2	26.06.2014	27.06.2014	B1_WA	B2_WE	106	102 103
106	FE_AU	3	B1_K2	24.06.2014	26.06.2014	B1_WE	B1_WA	107 108	102 103 105
107	BE_AN	6	BM3	22.06.2014	24.06.2014	L3	B1_WE		102 103 105 106
108	BE_AN	3	BM2	20.06.2014	24.06.2014	L3	B1_WE		102 103 105 106
109	UL_BE	1	A3	08.06.2014	09.06.2014	A_WA	B1_WA	110	
110	FE_AU	1	A3	07.06.2014	08.06.2014	A_WE	A_WA	111	109
111	BE_AN	1	AM3	03.06.2014	07.06.2014	L4	A_WE		109 110
112	UL_BE	2	B2_3	08.06.2014	09.06.2014	B2_WA	B1_WA	113	
113	FE_AU	2	B2_3	04.06.2014	08.06.2014	B2_WE	B2_WA	114 115	112
114	BE_AN	4	BM3	02.06.2014	04.06.2014	L3	B2_WE		112 113
115	BE_AN	2	BM1	03.06.2014	04.06.2014	L3	B2_WE		112 113
116	UL_BE	2	C1	08.06.2014	09.06.2014	C_WA	B1_WA	117	
117	FE_AU	2	C1	02.06.2014	08.06.2014	C_WE	C_WA	118 119	116
118	BE_AN	8	CM2	30.05.2014	02.06.2014	L1	C_WE		116 117
119	BE_AN	2	CM3	01.06.2014	02.06.2014	L2	C_WE		116 117
120	UL_BE	1	A3	22.06.2014	23.06.2014	A_WA	B1_WA	121	
121	FE_AU	1	A3	21.06.2014	22.06.2014	A_WE	A_WA	122	120
122	BE_AN	1	AM3	17.06.2014	21.06.2014	L4	A_WE		120 121
123	UL_BE	2	B2_3	22.06.2014	23.06.2014	B2_WA	B1_WA	124	
124	FE_AU	2	B2_3	18.06.2014	22.06.2014	B2_WE	B2_WA	125 126	123
125	BE_AN	4	BM3	16.06.2014	18.06.2014	L3	B2_WE		123 124
126	BE_AN	2	BM1	17.06.2014	18.06.2014	L3	B2_WE		123 124
127	UL_BE	2	C1	22.06.2014	23.06.2014	C_WA	B1_WA	128	
128	FE_AU	2	C1	16.06.2014	22.06.2014	C_WE	C_WA	129 130	127
129	BE_AN	8	CM2	13.06.2014	16.06.2014	L1	C_WE		127 128
130	BE_AN	2	CM3	15.06.2014	16.06.2014	L2	C_WE		127 128

10.2 Auswertungsergebnisse

10.2.1 Experiment 15

#	Liefertreue (%)	Kapital (€)	Epsilon	GD
0	0,0	0,0	0,0	0,0
300	73,2	2885,4	23,5	14,3
600	73,3	2895,5	23,5	14,2
900	73,8	2907,3	23,4	14,1
1200	74,2	2932,0	23,3	13,9
1500	74,6	2967,1	22,4	13,7
1800	75,1	2955,6	21,5	13,5
2100	75,6	2950,5	21,5	13,3
2400	76,7	2958,8	20,9	12,8
2700	77,6	2924,4	21,1	12,5
3000	78,5	2889,0	20,9	12,2
3300	79,0	2853,7	21,0	11,9
3600	79,2	2833,6	21,1	11,8
3900	79,3	2840,5	22,8	11,7
4200	79,7	2836,0	20,3	11,5
4500	79,6	2803,2	18,5	11,6
4800	80,3	2835,4	18,6	11,2
5100	80,9	2810,0	18,6	10,9
5400	81,5	2773,7	18,8	10,7
5700	81,5	2807,2	18,6	10,6
6000	81,5	2818,7	20,7	10,7
6300	81,8	2839,6	20,7	10,5
6600	82,3	2790,6	19,4	10,3
6900	83,2	2814,7	17,5	9,9
7200	83,7	2825,5	14,9	9,7
7500	83,8	2865,8	14,9	9,7
7800	83,8	2832,9	14,2	9,7
8100	84,3	2823,0	14,4	9,5
8400	84,4	2814,9	14,3	9,4
8700	84,7	2837,8	13,7	9,3
9000	85,4	2853,0	13,7	9,0
9300	85,5	2851,1	12,2	9,0
9600	85,9	2853,7	12,2	8,7
9900	87,2	2882,7	11,7	8,3
10200	88,1	2942,7	11,7	7,8
10500	88,4	2919,1	8,0	7,6
10800	88,8	2919,6	8,0	7,2
11100	89,5	2904,2	7,8	6,8
11400	89,8	2964,9	7,8	6,6
11700	89,9	2959,1	8,1	6,6
12000	90,6	3021,1	6,5	6,2
12300	90,2	2962,3	6,4	6,3
12600	90,5	2977,3	4,6	6,2
12900	91,5	3013,0	4,5	5,7
13200	92,2	3045,2	4,5	5,2
13500	92,1	3056,1	4,5	5,3
13800	92,1	3082,7	4,5	5,2
14100	92,1	3088,8	4,5	5,3
14400	92,3	3098,1	4,5	5,1
14700	92,4	3102,1	4,5	5,1
15000	92,6	3098,9	4,5	5,0
15300	92,5	3082,3	4,5	5,1

15600	92,8	3068,8	4,5	4,9
15900	92,8	3058,4	4,4	4,8
16200	92,8	3028,5	4,4	4,8
16500	92,8	3044,4	4,6	4,8
16800	93,0	3027,9	4,6	4,6
17100	93,3	3058,6	4,5	4,5
17400	93,4	3068,9	4,5	4,4
17700	93,5	3078,9	4,5	4,4
18000	93,3	3069,9	4,5	4,5
18300	93,6	3060,6	4,5	4,4
18600	93,6	3061,9	4,5	4,4
18900	93,9	3056,1	4,3	4,2
19200	94,0	3031,3	4,0	4,2
19500	93,9	2989,8	3,9	4,2
19800	94,2	2967,4	3,9	3,9
20100	94,4	2991,5	3,9	3,7
20400	94,7	3026,8	4,0	3,6
20700	94,7	3018,4	4,0	3,6
21000	94,8	3034,2	3,9	3,6
21300	94,9	2996,4	3,9	3,5
21600	94,8	2984,0	3,9	3,6
21900	94,8	2999,7	2,0	3,6
22200	94,8	3010,9	2,0	3,8
22500	94,9	2982,0	2,0	3,7
22800	94,8	2976,9	2,0	3,8
23100	94,9	2971,3	2,0	3,8
23400	95,1	2964,8	2,3	3,6
23700	95,1	2962,1	2,2	3,6
24000	95,4	2950,1	2,2	3,5
24300	95,8	2910,6	2,1	3,3
24600	96,3	2947,8	2,1	2,7
24900	96,4	2967,8	2,1	2,6
25200	96,5	2984,8	2,1	2,7
25500	97,1	3082,8	1,8	2,3
25800	97,8	3124,1	1,8	1,6
26100	98,2	3158,8	1,8	1,4
26400	98,3	3149,3	1,8	1,4
26700	98,3	3146,3	1,8	1,3
27000	98,3	3140,9	1,8	1,4
27300	98,3	3152,9	1,8	1,3
27600	98,4	3141,8	1,8	1,3
27900	98,5	3131,9	1,8	1,2
28200	98,7	3126,7	1,8	1,1
28500	98,7	3132,4	1,8	1,1
28800	98,6	3101,9	1,8	1,3
29100	98,6	3092,0	1,8	1,4
29400	98,7	3115,4	1,8	1,3
29700	98,9	3146,8	1,8	1,1
30000	99,0	3153,0	1,8	0,9
30300	99,1	3156,5	1,8	0,9
30600	99,1	3132,9	1,8	0,9
30900	99,1	3130,5	1,8	0,8
31200	99,1	3127,8	1,8	0,8
31500	99,1	3123,1	1,8	0,8
31800	99,1	3121,0	1,8	0,8
32100	99,2	3123,7	1,8	0,8
32400	99,3	3116,9	0,1	0,8
32700	99,2	3111,3	0,1	0,8
33000	99,3	3106,9	0,1	0,8

33300	99,4	3119,9	0,0	0,8
33600	99,5	3106,8	0,0	0,6
33900	99,6	3078,8	0,0	0,5
34200	99,8	3036,4	0,0	0,4
34500	100,0	3030,5	0,0	0,1
34800	100,0	3030,5	0,0	0,1
35100	100,0	3030,5	0,0	0,1
35400	100,0	3030,5	0,0	0,1
35700	100,0	3030,5	0,0	0,1
36000	100,0	3030,5	0,0	0,1

Tabelle 10.2: Korrelationswerte Experiment 15

Korrelation Liefertreue	Epsilon	Generational Distance
	-0,98	-0,996

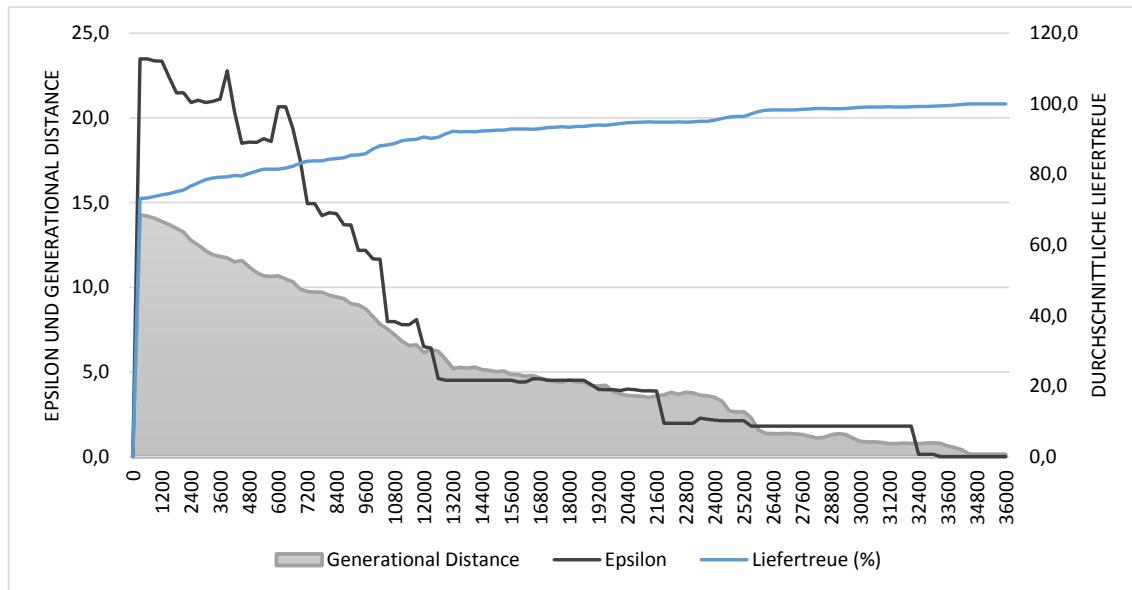


Abbildung 10.1: Verlauf der Qualitätsindikatoren Experiment 15

10.2.2 Zufallssuche

#	Liefertreue (%)	Kapital (€)	#	Liefertreue (%)	Kapital (€)
0	0,0	0,0	126000	76,2	3031,0
3000	73,0	2968,7	129000	76,2	3030,1
6000	73,1	2897,4	132000	76,2	3030,9
9000	73,4	2906,0	135000	76,2	3030,9
12000	73,7	2922,3	138000	76,3	3032,6
15000	74,1	2939,4	141000	76,3	3034,0
18000	74,2	2962,4	144000	76,4	3034,2
21000	74,2	2955,5	147000	76,4	3033,6
24000	74,3	2950,7	150000	76,4	3034,1
27000	74,4	2962,5	153000	76,4	3034,2
30000	74,5	2964,0	156000	76,5	3036,8
33000	74,7	2974,9	159000	76,5	3037,8
36000	74,8	2986,7	162000	76,5	3036,2
39000	75,0	2992,1	165000	76,5	3036,7
42000	75,0	2992,8	168000	76,5	3038,2
45000	75,1	2996,1	171000	76,5	3039,4
48000	75,1	2997,0	174000	76,6	3042,2
51000	75,2	3005,0	177000	76,6	3044,7
54000	75,3	3006,8	180000	76,7	3049,5
57000	75,4	3007,2	183000	76,7	3048,5
60000	75,4	3007,0	186000	76,7	3050,2
63000	75,4	3007,8	189000	76,7	3050,0
66000	75,4	3001,2	192000	76,7	3050,8
69000	75,5	3002,5	195000	76,7	3050,2
72000	75,5	3005,9	198000	76,7	3050,1
75000	75,5	3005,2	201000	76,7	3048,4
78000	75,6	3013,4	204000	76,8	3047,4
81000	75,6	3014,8	207000	76,8	3047,6
84000	75,6	3018,1	210000	76,8	3048,7
87000	75,6	3018,3	213000	76,8	3049,7
90000	75,8	3030,6	216000	76,8	3048,6
93000	75,8	3032,3	219000	76,8	3049,7
96000	75,8	3034,3	222000	76,8	3048,4
99000	75,9	3033,2	225000	76,8	3047,8
102000	75,8	3032,4	228000	76,8	3049,6
105000	75,8	3033,1	231000	76,9	3050,8
108000	75,9	3031,6	234000	76,9	3050,7
111000	76,0	3030,0	237000	76,9	3048,9
114000	76,1	3034,1	240000	76,9	3047,8
117000	76,1	3034,3	243000	76,9	3047,4
120000	76,1	3032,9	246000	76,9	3046,6
123000	76,2	3028,6	249000	77,0	3047,6