



Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Wirtschaftsinformatik, insb. CIM

Dissertation

**Gewinnmaximierende Losgrößen-,
Reihenfolge- und Kapazitätssteuerung bei
bekannter Vergangenheit, gegebenen
Elementarfaktoren und begrenzter
Bedarfsanmeldung**

Stefan Klöpfer

Gewinnmaximierende Losgrößen-,
Reihenfolge- und Kapazitätssteuerung bei
bekannter Vergangenheit, gegebenen
Elementarfaktoren und begrenzter
Bedarfsanmeldung

Dissertation
zur Erlangung der Würde des
Doktors der Wirtschaftswissenschaften
(Dr. rer. pol.)
der Universität Paderborn

vorgelegt von
Dipl.-Wirt.-Inf. Stefan Klöpfer
33142 Büren

Paderborn, Juni 2012

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis.....	v
1 Einleitung	1
2 Problemdefinition	3
2.1 Definition des Betrachtungsgegenstands.....	3
2.1.1 Bekannte Vergangenheit und begrenzte Bedarfsanmeldung	4
2.1.2 Situation hinsichtlich gegebener Elementarfaktoren.....	7
2.1.3 Bestandteile des Zielsystems	10
2.1.4 Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsbestimmung als interdependente Teilprobleme	13
2.1.5 Rollierende Planung zur Steuerung bei offenem Horizont	16
2.2 Bedarfsdynamik im Kontext der Steuerungsaufgabe.....	18
2.2.1 Charakteristik der kundenseitigen Dynamik.....	18
2.2.2 Auswirkungen innerhalb eines Planungszyklus	20
2.2.3 Auswirkungen zwischen Planungszyklen	22
2.3 Anforderungen an die Problemlösung zur Gewinnmaximierung bei bekannter Vergangenheit.....	24
2.3.1 Musterbasierte Analyse des kundenseitigen Bestellverhaltens	25
2.3.2 Abbildung der Bedarfsunsicherheit bei begrenzter Bedarfsanmeldung.....	27
2.3.3 Steuerung der Entscheidungsgrößen bei gegebener Bedarfsunsicherheit.....	30
3 Stand der Technik.....	33
3.1 Mustererkennung im Kontext von Zeitreihen	33
3.1.1 Datenaufbereitung	34
3.1.2 Klassische Zeitreihenanalyse	35
3.1.3 Zeitreihenclustering	38
3.2 Abbildung von Bedarfsunsicherheit.....	44
3.2.1 Modellierung und Analyse von Bedarfsunsicherheit	44

3.2.2	Integration von Bedarfsunsicherheit in mathematische Optimierungsprobleme.....	49
3.3	Steuerung der Produktionsentscheidungen bei gegebener Bedarfsunsicherheit.....	51
3.3.1	Ansätze auf Basis von Lagerhaltungspolitiken	51
3.3.2	Ansätze der Produktionsablaufplanung.....	53
4	Zu leistende Arbeit.....	61
4.1	Entwicklung des Szenariogenerators zur situationsbedingten Abbildung der Bedarfsunsicherheit.....	61
4.2	Entwicklung des mathematischen Planungsmodells als Steuerungsgrundlage	62
4.3	Integration von Planungsmodell und Szenariogenerator in einen Steuerungsprozess.....	62
5	Konzeption.....	63
5.1	Entwicklung des Szenariogenerators zur situationsbedingten Abbildung der Bedarfsunsicherheit.....	63
5.1.1	Aufbereitung der vorhandenen Bestellinformationen	63
5.1.2	Ermittlung bedarfs- und verbrauchsorientierter Muster	65
5.1.3	Bestimmung der empirischen Prognosefehlerverteilungen	74
5.1.4	Klassifikation der Bestellinformationen.....	76
5.1.5	Ableiten von Bedarfsszenarien.....	79
5.2	Entwicklung des mathematischen Planungsmodells als Steuerungsgrundlage	84
5.2.1	Systematisierung der Modellierung	85
5.2.2	Eingabe	89
5.2.3	Ausgabe	91
5.2.4	Zielfunktion.....	92
5.2.5	Restriktionen	95
5.2.6	Bewältigung komplexer Probleminstanzen	105
5.3	Integration von Planungsmodell und Szenariogenerator in einen Steuerungsprozess.....	108
6	Evaluierung.....	113
6.1	Datenbasis	113
6.1.1	Stammdaten.....	113
6.1.2	Bewegungsdaten	115
6.2	Anwendung des Verfahrens und Ergebnisse	118

6.2.1	Ablauf der Auswertung	118
6.2.2	Ergebnisse der klassischen reaktiven Steuerung	120
6.2.3	Ergebnisse der Offline Planung	123
6.2.4	Ergebnisse der entworfenen proaktiven Steuerung	125
6.2.5	Fazit.....	132
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	137
8	Literaturverzeichnis.....	141

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Problemkontext (in Anlehnung an [Tha97])	1
Abbildung 2: Zusammenhang der Bestandteile des Betrachtungsgegenstands	3
Abbildung 3: Bedarfsanmeldung und Fortschreibung bezüglich H2-H3	5
Abbildung 4: Bedarfsanmeldung und Fortschreibung bezüglich H1-H2	6
Abbildung 5: Beispielhafte Bedarfssituation im Nahbereich	6
Abbildung 6: Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (vgl. [Zöp01, S.192])	15
Abbildung 7: Ablauf der rollierenden Planung	17
Abbildung 8: Ursachen kundenseitiger Bedarfsdynamik (vgl. [Bar06, S.6–9])	18
Abbildung 9: Auswirkung unterschiedlich dimensionierter Planungshorizonte	21
Abbildung 10: Ein-/ Ausgabe des Modells zur Abbildung der Bedarfsunsicherheit	28
Abbildung 11: Struktur eines hybriden Vorhersagesystems [Bre02, S.38]	46
Abbildung 12: Ablauf der situationsbedingten Abbildung von Bedarfsunsicherheit ..	63
Abbildung 13: Idealisierte Kennlinien zur Bestimmung von R	68
Abbildung 14: Ablauf der verbrauchsorientierten Mustererkennung	70
Abbildung 15: Beispielhafte Abbildung eines Musters durch empirische Häufigkeitsverteilungen	71
Abbildung 16: Motif Mining im Fall der bedarfsorientierten Zeitreihen	73
Abbildung 17: Typisches Streuverhalten im Zeitverlauf am Beispiel der Mengendimension.....	74
Abbildung 18: Schematische Grobdarstellung der Klassifikationsaufgabe (erweiterte Visualisierung in Anlehnung an [HB10])	76
Abbildung 19: Grobablauf der Szenariosetgenerierung.....	80
Abbildung 20: Ablauf der Selektion alternativer Bestellmengen unter Verwendung eines verbrauchsorientierten Musters am Beispiel.....	82
Abbildung 21: Integration von Bedarfsunsicherheit im Planungsmodell.....	85
Abbildung 22: Ablauf des Verfahrens zur Generierung einer (Start-) Lösung	105
Abbildung 23: Ablauf des entwickelten Steuerungsprozesses	108
Abbildung 24: Klassifikation der evaluierten Bewegungsdaten.....	116
Abbildung 25: Übersicht des Ablaufs der Auswertung	119
Abbildung 26: Ergebnis der Herleitung von R im verbrauchsorientierten Fall	126
Abbildung 27: Verbrauchsorientiertes Muster der Länge sieben.....	127
Abbildung 28: Ergebnisse des entwickelten Lösungsprozesses.....	132
Abbildung 29: Gegenüberstellung der kumulierten reaktiven und proaktiven Ergebnisse im Vergleich zum Offline-Optimum	133
Abbildung 30: Bestandsentwicklung von E0-Fall 1 und E1-Fall 2	134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Das Faktorsystem nach Gutenberg [Gut58].....	7
Tabelle 2: Übersicht der monetären Zielgrößen.....	12
Tabelle 3: Überblick hinsichtlich zu erkennendem musterbasierten Bestellverhalten (in Anlehnung an [Bar06, S.109], [Dan09b, S.378])	26
Tabelle 4: Modelle der Zeitreihenprognose (vgl. [Cro08, S.90], [Bre02, S.15–17])	37
Tabelle 5: Der 1-Motif Brute Force Algorithmus [Lin et al.02, S.56]	42
Tabelle 6: Systematik der Strukturdimensionen von Bestellmengenmodellen (vgl. [Cro08, S.40])	52
Tabelle 7: Der k-Motif Brute Force Algorithmus.....	67
Tabelle 8: Übersicht der Detaillierungsgrade des zeitbasierten Aggregationsschemas	87
Tabelle 9: Parameter zur Generierung einer Startlösung.....	107
Tabelle 10: Stammdaten - Monetäre, erzeugnisbezogene Daten	114
Tabelle 11: Stammdaten - Maschinenbezogene Daten.....	114
Tabelle 12: Stammdaten - Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten der Erzeugnisse	115
Tabelle 13: Stammdaten - Schichtbezogene Daten	115
Tabelle 14: Bewegungsdaten - Künftige Bestellanmeldungen.....	118
Tabelle 15: Ergebnis der reaktiven Steuerung Fall 1	121
Tabelle 16: Ergebnis der reaktiven Steuerung Fall 2.....	122
Tabelle 17: Ergebnis der reaktiven Steuerung Fall 3.....	122
Tabelle 18: Ergebnis der offline Steuerung Fall 1	124
Tabelle 19: Ergebnis der offline Steuerung Fall 2.....	124
Tabelle 20: Ergebnis der offline Steuerung Fall 3.....	125
Tabelle 21: Ergebnis der proaktiven Steuerung Fall 1	129
Tabelle 22: Ergebnis der proaktiven Steuerung Fall 2	129
Tabelle 23: Ergebnis der proaktiven Steuerung Fall 3	130

1 Einleitung

Die Beherrschung von Nachfrageschwankungen wird aktuell als eine der größten Herausforderungen des Supply Chain Managements betrachtet (vgl. [VS11]). Die gegensätzlichen Flexibilitätsziele von Lieferant und Abnehmern führen häufig zu einer vertraglichen Reglementierung hinsichtlich der möglichen Lieferabrufe (vgl. Abbildung 1). Infolge des fortwährend hohen Wettbewerbsdrucks resultiert dies aus Lieferantensicht in erheblicher Bedarfsunsicherheit und der Notwendigkeit auch bei kurzfristigen Bedarfsspitzen die Lieferfähigkeit sicherzustellen. Vor dem Hintergrund der Kapitalbindung und bereits getroffener strategischer sowie taktischer Entscheidungen ist eine Realisierung durch Sicherheitsbestände gegebenenfalls nicht möglich, allgemein jedoch unwirtschaftlich. Die Praxisrelevanz zeigt sich am Beispiel Hewlett-Packard, deren Bestandsinvestitionen zu etwa 60 % auf Bedarfsunsicherheit zurückgeführt werden konnten (vgl. [Dav93]). Insbesondere in hoch entwickelten Industriestaaten ist vor diesem Hintergrund von einer Flexibilisierung des Personaleinsatzes auszugehen, da Arbeitskosten nicht nur einen signifikanten Anteil der gesamten Produktionskosten ausmachen, sondern die flexible Schichtzuordnung es außerdem ermöglicht, das Kapazitätsangebot in einer effektiven Art zu variieren (vgl. [Brü10]).

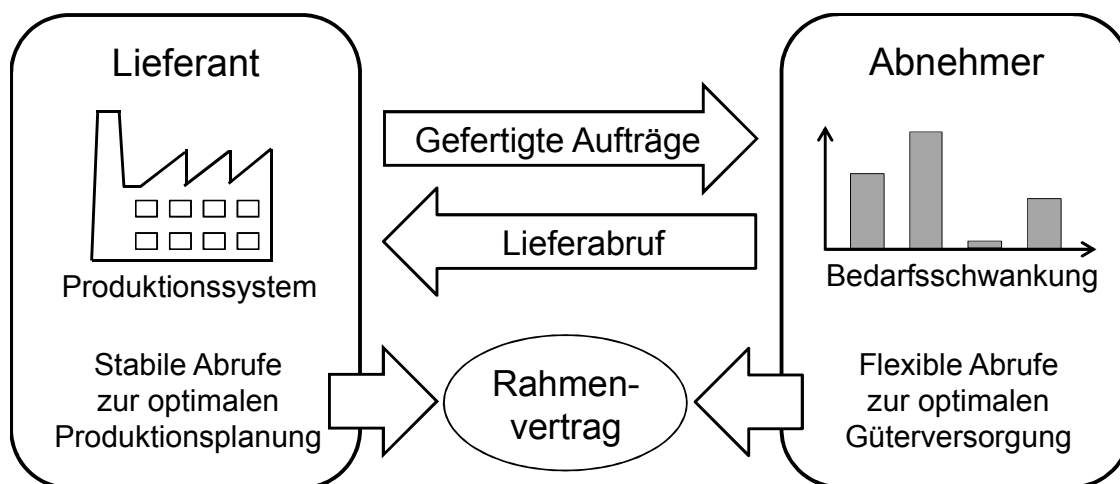


Abbildung 1: Problemkontext (in Anlehnung an [Tha97])

Die beschriebene Problematik determiniert die Ziele der operativen Produktionsplanung sowie -steuerung und damit den Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit. Zur Zielerreichung sind gewinnmaximierende Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen zu treffen, welche zahlreichen Anforderungen in Bezug auf die spezifische quantita-

tive und qualitative Kapazität der gegebenen Elementarfaktoren unterliegen. Das grundlegende Problem wurde bereits in Form von gemischt ganzzahligen linearen Programmen in der Literatur definiert. Jene Modelle vernachlässigen jedoch praxisnahe Aspekte, deren Kapazitätswirksamkeit erheblichen Einfluss auf die Erreichung des Formalziels ausübt. Insbesondere sind in diesem Zusammenhang reihenfolgeabhängige Rüstzeiten, maschinen- und belastungsabhängige Wartungsintervalle, auf Tages- und Maschinenebene wählbare Schichtmodelle sowie die kundenseitige Bedarfsdynamik zu nennen.

Im Rahmen der vorhandenen Bedarfsunsicherheit ist es nicht zielführend die detaillierte Planung für einen längerfristigen Horizont optimal durchzuführen und umzusetzen. Stattdessen rückt die zeitliche Koordination von Plänen durch Verwendung des Konzepts der rollierenden Planung in den Vordergrund, um die Entscheidungsgrößen gewinnmaximierend zu steuern. Je Planungszyklus wird daher der Horizont sowohl hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit des Produktionssystems als auch der zeitlichen Auflösung in drei gekoppelte Teilhorizonte mit abnehmender Granularität gegliedert, deren Betrachtung dennoch simultan erfolgt. Eine rein reaktive Planung ist zur wirtschaftlichen Bewältigung der Nachfrageschwankungen allerdings unzureichend, weshalb das Bestellverhalten auf Kunden-/Erzeugnisebene hinsichtlich charakteristischer, verbrauchs- und bedarfsorientierter Bestellmuster analysiert wird. Ergänzend erfolgt eine Auswertung der Prognosefehler auf zeitvariantes Verhalten im Bestellverlauf. Die ermittelten Informationen liefern die Grundlage zur systematischen Ableitung alternativer Bedarfsentwicklungen, um darauf aufbauend eine proaktive Steuerung durchzuführen, welche situationsabhängig über die Antizipation der unsicheren Bedarfe entscheidet und damit die gegebenen Potenziale realisiert.

2 Problemdefinition

In diesem Kapitel erfolgt die Präzisierung der einleitend dargestellten Aufgabe in Form einer dreigliedrigen Problemdefinition. Zunächst wird im anschließenden Abschnitt 2.1 die Abgrenzung des Betrachtungsgegenstands sowie die Festlegung der Eigenschaften und Zusammenhänge der einzelnen Bestandteile geleistet. In Abschnitt 2.2 folgt die Erläuterung der Bedarfsdynamik als Störgröße und deren Auswirkung im Kontext der definierten Steuerungsaufgabe. Auf dieser Basis schließt Abschnitt 2.3 die Problemdefinition mit der Formulierung der Anforderungen an die Lösung zur Gewinnmaximierung ab.

2.1 Definition des Betrachtungsgegenstands

Zentraler Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit ist der wirtschaftliche Vollzug der Aufgabenerfüllung bei dynamischen Kundenbedarfen. In Abschnitt 2.1.1 erfolgt daher zunächst die Beschreibung des Ablaufs kundenseitiger Bedarfsanmeldungen, um die künftigen Absatzmöglichkeiten festzulegen. Zur Aufgabenerfüllung werden Elementarfaktoren als begrenzte Ressource eingesetzt, deren Spezifikation sich in Abschnitt 2.1.2 anschließt. Mit dem Ziel der Wirtschaftlichkeit geht die Notwendigkeit der Definition relevanter monetärer Größen einher, anhand dessen eine quantitative Bewertung erfolgen kann. Die Gesamtheit dieser Größen sowie deren Verknüpfung wird als Zielsystem bezeichnet und in Abschnitt 2.1.3 definiert. Die Einflussnahme auf den Vollzug der Aufgabe erfolgt durch interdependente Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen, welche in Abschnitt 2.1.4 dargestellt werden. Den Zusammenhang aller genannten Bestandteile veranschaulicht Abbildung 2.



Abbildung 2: Zusammenhang der Bestandteile des Betrachtungsgegenstands

Auf Basis dieser definierten Rahmenbedingungen vervollständigt die Erläuterung der Steuerung durch rollierende Planung in Abschnitt 2.1.5 die Beschreibung des Betrachtungsgegenstands.

2.1.1 Bekannte Vergangenheit und begrenzte Bedarfsanmeldung

Sei eine Menge von Kunden K gegeben, wobei jeder eine Teilmenge der herstellbaren und nicht zwangsweise kundenspezifischen Erzeugnisse E regelmäßig bestellt. Es gilt:

$$\forall k \in K: E_k \subseteq E, |E_k| > 0 \quad (2.1)$$

Mit jedem Kunden wurden Rahmenverträge geschlossen, die mögliche Bedarfsanmeldungen und deren Fortschreibung auf Erzeugnisebene reglementieren. Dabei handelt es sich unter anderem um:

1. Reichweite des Bedarfsvorschauhorizonts
2. Beschränkung hinsichtlich Mengenanpassungen
3. Beschränkung hinsichtlich Terminanpassungen
4. Verbindliche, langfristige Mindestabnahmemenge

Als Ergebnis der Vertragsverhandlungen liegen daher zu jedem Aspekt korrespondierende Parameter in Abhängigkeit von (k, e) vor. Im Fall der Reichweite des Vorschauhorizonts wird in Anlehnung an [VDA4916], [VDA4915] und [VDA4905] von drei Teilhorizonten und den resultierenden Parametern $H1_{k,e}$, $H2_{k,e}$, $H3_{k,e}$ ausgegangen. Diese bezeichnen die letzte Periode des zugehörigen Horizonts. Es gilt:

$$\forall k \in K, e \in E_k: H1_{k,e}, H2_{k,e}, H3_{k,e} \in \mathbb{N} \wedge H1_{k,e} < H2_{k,e} < H3_{k,e} \quad (2.2)$$

Der Detaillierungsgrad der Bestellinformationen ist ausgehend vom Planungsdatum für Perioden kleiner gleich $H2_{k,e}$ tagesgenau, für Perioden größer $H2_{k,e}$ wochengenau¹. Für den Zeitraum, der in $H3_{k,e}$ Perioden beginnt, liegen keine Bestelldaten vor. Die einzige Information hinsichtlich möglicher Kundenbedarfe ist durch die im Rahmenvertrag vereinbarte, langfristig garantierte Mindestabnahmemenge gegeben. Nachdem die Bestandteile der Rahmenverträge definiert wurden, folgt die Darstellung der Bedarfsanmeldung. Jede Bestellung b für Erzeugnis e des Kunden k wird erstmalig für Periode

¹ Die Annahme entspricht nicht exakt den Möglichkeiten der VDA-Empfehlungen. Nach VDA4916 ist das Zeitraster kontinuierlich. Im Fall von VDA4915 wird von einer tagesgenauen Betrachtung ausgegangen. In VDA4905 wird wahlweise eine Tages-, Wochen- oder Monatsbasis bzw. eine Kombination der Alternativen unterstellt. Es wird daher angenommen, dass alle untertägigen Information zu tagbasierten zusammenfasst werden und in den ersten Teilhorizont eingehen. Bezüglich des zweiten Teilhorizonts finden sich dagegen nur taggenaue Daten hinsichtlich VDA4915/4905. Wochengenaue Daten Letzterer werden dem dritten Teilhorizont zugerechnet. Ein üblicher Horizont für tagesgenaue Bestellinformationen umfasst etwa 56 Tage (vgl. [Tha97]), mindestens jedoch (VDA4915) 5 Tage.

$H3_{k,e}$ mit Bestellmenge M_b sowie entsprechendem Liefertermin T_b angemeldet und periodenweise fortgeschrieben. Die Beschränkung angemeldeter Bestellungen hinsichtlich Mengen- und Terminänderungen wird in Abhängigkeit des Horizonts betrachtet. Mengenanpassungen sind bezogen auf die initial angemeldete Bestellmenge anteilig durch $\Delta H3_{k,e}^{Menge}$ begrenzt. Analog gilt auch die Beschränkung der Terminänderung durch $\Delta H3_{k,e}^{Termin}$, jedoch aufgrund von Datumswerten als Absolutdifferenz. Abbildung 3 veranschaulicht den beschriebenen Prozess in dem Bestellung b im gegebenen Korridor über den betrachteten Horizont von $[H3_{k,e}, H2_{k,e} + 1]$ schwanken kann und damit zum Planungszeitpunkt lediglich eine grobe Vorschau (auf Wochenbasis) liefert.

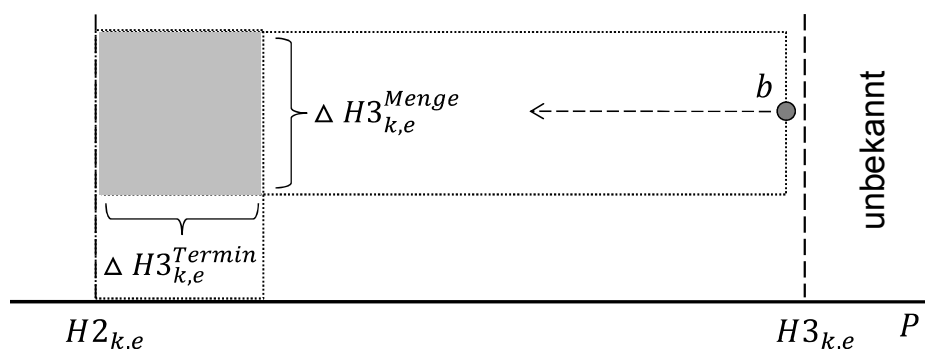


Abbildung 3: Bedarfsanmeldung und Fortschreibung bezüglich H2-H3

Aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Granularität der Perioden kleiner gleich bzw. größer $H2$ erfolgen für einen Informationszustand des wochengenauen Horizonts genau 7 Datenaktualisierungen im tagesgenauen Bereich. Entspricht der Liefertermin einer Bestellung der zu Periode $H2_{k,e} + 1$ korrespondierenden Kalenderwoche, so ist diese von Wochenbasis auf Tagesbasis zu detaillieren. Im Vorhinein ist die Aufteilung des Wochenbedarfs auf die einzelnen Tage jedoch unbekannt. Es wird wiederum angenommen, dass Kunde k Bestellungen b für Erzeugnis e initial für Periode $H2_{k,e}$ anmeldet. Für diese Bestellungen gilt, dass sie sowohl mengen- als auch terminbezogene Schwankungsgrenzen einhalten, welche durch $\Delta H2_k^{Menge}$ bzw. $\Delta H2_k^{Termin}$ und die initialen Bestellinformationen bezüglich $H2_{k,e}$ gegeben sind. Darüber hinaus hat die kumulierte Bestellmenge (unter Berücksichtigung der Toleranzen bzgl. $H3$) der wochenbasierten Bestellmenge zu entsprechen. Abbildung 4 illustriert diesen Sachverhalt beispielhaft für den Fall der sukzessiv bekannt gewordenen Dreiteilung einer Wochenbestellung b .

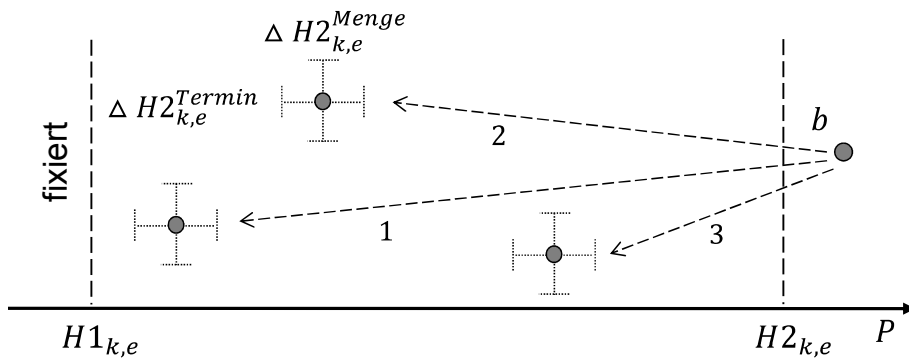


Abbildung 4: Bedarfsanmeldung und Fortschreibung bezüglich H1-H2

Sobald der Liefertermin einer beliebigen Bestellung genau $H1_{k,e}$ Tage in der Zukunft liegt wird davon ausgegangen, dass diese rechtsverbindlichen Charakter angenommen hat und damit die tatsächliche Bestellmenge und der Liefertermin vorliegen. Bestellungen des ersten Teilplanungshorizonts werden damit ohne weitere Änderung im Bereich von $H1_{k,e}$ bis P_0 fortgeschrieben. Betrachtet man die vorliegenden Informationen im Bereich der tagesgenauen Horizonte über alle Bestellungen aller Kunden und deren bezogenen Erzeugnisse hinweg wird deutlich, dass trotz der vorgestellten Beschränkungen eine signifikante Unsicherheit bezüglich der Bedarfsmengen besteht (vgl. Abbildung 5).

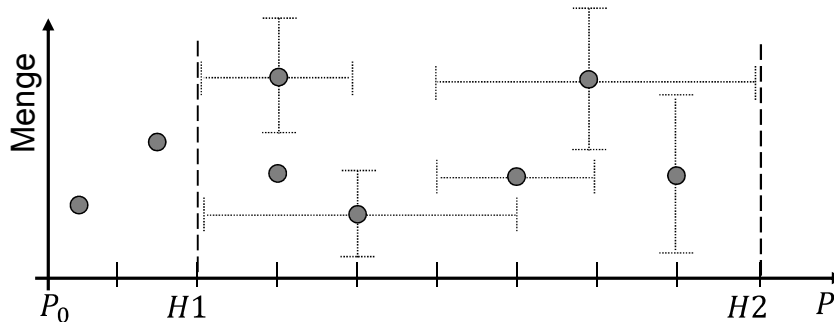


Abbildung 5: Beispielhafte Bedarfssituation im Nahbereich

Die dargestellte Situation lässt sich durch die Vereinheitlichung der bisher kunden-, erzeugnisbezogenen Teilhorizontlängen erklären. Die betreffenden Indizes folgen aus:

$$H1 := \min_{k \in K, e \in E_k} H1_{k,e} \quad H2 := \min_{k \in K, e \in E_k} H2_{k,e} \quad (2.3)$$

Diese Einteilung garantiert auf der einen Seite, dass lediglich sichere Bestellinformationen bezüglich $[P_0, \dots, H1]$ vorliegen und auf der anderen Seite, dass für Perioden aus $[H1 + 1, \dots, H2]$ ebenfalls alle Informationen auf Tagesbasis definiert sind. Es ist je-

doch zu beachten, dass ggf. fixierte Bestellungen im zweiten Teilhorizont sowie Tages- und Wochendaten im dritten Teilhorizont vorkommen können. Die Unsicherheit einer Periode p ergibt sich mengenmäßig durch die kumulierten maximal möglichen Mengenabweichungen der Bestellungen, deren Liefertermin ausgehend vom Planungsdatum unter Berücksichtigung der erlaubten Terminabweichung p entsprechen kann. Es wird unterstellt, dass der Verlauf aller historischen Bestellungen persistent gespeichert ist, sodass für jeden Kunden eine Menge von Bestellverläufen existiert, wobei jedes Element wiederum als Menge von Bestellmengen/ Liefertermin-Tupel definiert sei.

2.1.2 Situation hinsichtlich gegebener Elementarfaktoren

Die Produktion zur Realisierung der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Absatzmöglichkeiten erfolgt auf Basis gegebener Elementarfaktoren. Es handelt sich dabei um eine Teilmenge der Produktionsfaktoren, welche die dispositiven Faktoren² ausschließt und damit nur die Faktoren enthält, welche "unmittelbar mit der Leistungserstellung verbunden sind [...]" [Beu96, S.1500]. Eine Aufgliederung der einzelnen Bestandteile findet sich in Tabelle 1.

Produktionsfaktoren						
Elementarfaktoren						Dispositive Faktoren
Werkstoffe		Betriebsmittel			Menschliche Arbeit am Objekt	
Rohstoffe	Hilfsstoffe	Betriebsstoffe	Materielle Betriebsmittel	Immaterielle Betriebsmittel		

Tabelle 1: Das Faktorsystem nach Gutenberg [Gut58]

Es wird unterstellt, dass für jeden benötigten Roh-, Hilfs- und Betriebsstoff (Verbrauchsfaktoren³) eine Wiederbeschaffungszeit durch Funktion f_{wbz} zu bestimmen ist.

$$f_{wbz}(\text{verbrauchsfaktor}) \rightarrow \mathbb{N} \quad (2.4)$$

² Dispositive Faktoren lassen sich "in die drei Faktoren: Geschäfts- und Betriebsleitung, Planung und Organisation" [Gut58, S.27] untergliedern.

³ Zur Definition von Verbrauchs- und Gebrauchsfaktoren siehe [Dan09b, S.34].

Da die Materialbedarfsplanung⁴ kein Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit ist wird weiter angenommen, dass ein ausreichender Lagerbestand LB sichergestellt wurde. Sei eine Funktion $maxVerbrauch$ gegeben, welche die Anzahl an Mengeneinheiten eines Verbrauchsfaktors vk liefert, die im übergebenen Zeitraum höchstens benötigt werden kann. Unter Zuhilfenahme dieser Funktion muss folgende Bedingung gelten:

$$\forall vk \in Verbrauchsfaktoren: LB(vk) \geq maxVerbrauch(vk, f_{wbz}(vk)) \quad (2.5)$$

Materielle-/immaterielle Betriebsmittel sowie die menschliche Arbeit am Objekt werden auch als Verbrauchsfaktoren bezeichnet und nachfolgend spezifiziert. Bei den betrachteten Betriebsmitteln handelt es sich ausschließlich um Maschinen zur Durchführung der Arbeitsgänge sowie um ein Lager zur (teilweisen) Entkopplung von Produktion und Nachfrage. Entsprechend der Anzahl an Arbeitsgängen lässt sich eine Klassifikation nach einstufiger- und mehrstufiger Produktion vornehmen. Im Fall der hier zugrunde liegenden einstufigen Variante ist ferner nach Art der parallelen Maschinen zu differenzieren⁵. Es wird davon ausgegangen, dass eine feste Menge von heterogenen, parallelen Maschinen M zur Fertigung der Erzeugnisse E bereitsteht. Jede Maschine weist eine spezifische qualitative und quantitative Kapazität auf. Unter der qualitativen Kapazität (auch Leistungsfähigkeit) versteht man die Menge der Vorgangsklassen, in denen der Faktor verwendet werden kann (vgl. [Dan09b, S.248]). Damit folgt $\forall m \in M$:

$$Kapazität_{qualitativ}^{Maschine}(m) := \{e \in E: f_{produzierbar}(m, e)\} \quad (2.6)$$

$$f_{produzierbar}(m, e) \rightarrow \{0,1\} \quad (2.7)$$

Die quantitative Kapazität eines Verbrauchsfaktors „[...] ist ein Maß für die Quantität der in einem Zeitabschnitt durchführbaren Vorgänge bzw. herstellbaren Produkte“ [Dan09b, S.250]. Demnach entspricht der Kehrwert der Taktzeit $tz_{m,e}$ der quantitativen Kapazität. Im Fall der heterogenen Maschinen hängt diese vom Erzeugnis e und der betrachteten Maschine m ab. Es gilt $\forall m \in M, e \in E$:

⁴ Vgl. [Dan09b, S.1308].

⁵ Auch wenn die einstufige Produktion zunächst eine starke Einschränkung nahelegt, kann der mehrstufige Fall häufig wegen einer stationären Engpassstufe auf diesen Fall zurückgeführt werden (vgl. [FMW08, S.95]). Einen Überblick hinsichtlich möglicher Arten von parallelen Maschinen liefert [DSV97, S.284–285].

$$Kapazität_{quantitativ}^{Maschine}(m, e) := \begin{cases} \frac{1}{tz_{m,e}}, & f_{produzierbar}(m, e) = 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.8)$$

Alle Maschinen können gleichzeitig und unabhängig voneinander produzieren, jedoch zu einem Zeitpunkt immer höchstens ein Erzeugnis. Die quantitative Kapazität einer beliebigen parallelen Maschine innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls hängt in Bezug auf ein Erzeugnis darüber hinaus von dem derzeitigen Rüstzustand ab. Entspricht dieser nicht dem zu produzierenden Erzeugnis, so verringert sich die Kapazität im betrachteten Zeitraum um die Dauer, welche zum Rüstzustandswechsel von Erzeugnis e_1 auf e_2 benötigt wird. Diese Dauer ist durch das Tupel (e_1, e_2) eindeutig bestimmt und wird als reihenfolgeabhängige Rüstzeit bezeichnet⁶. Unter dem Rüstvorgang werden eine Reihe von produktionsvorbereitenden Tätigkeiten⁷ verstanden, die mit dem Ziel ausgeführt werden die Maschine in einen fertigungsfähigen Zustand zu überführen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass eine Maschine zu jedem Zeitpunkt immer in genau einem Rüstzustand ist⁸. Für den Fall das mit signifikanter Minderleistung in der Losanlaufphase gerechnet werden muss und deren Dauer grundsätzlich durch die Losgrößen übertroffen wird, ist dieser Aspekt durch eine Anpassung der Rüstzeiten zu berücksichtigen (vgl. [Ada98, S.478]).

Damit die definierte quantitative Maschinenkapazität als zeitinvariant angesehen werden kann, sind regelmäßige, präventive Instandhaltungsarbeiten durchzuführen. Bezüglich des Arbeitsinhalts ist zwischen Maßnahmen der Inspektion [...], der Wartung [...] und der Reparatur zu unterscheiden [Sch96, S.759]. Bei Missachtung dieser Maßnahmen würden die Betriebskosten (z. B. in Form von Ausschuss) und das Ausfallrisiko signifikant steigen. Es wird angenommen, dass die Verschleißentwicklung maschinenabhängig bekannt ist und sich daher jeweils ein wirtschaftlicher Wartungszeitpunkt über die Produktionsmenge seit dem letzten Wartungsvorgang ableiten lässt. In diesem Zusammenhang sind die unterschiedlichen Abnutzungsgrade je Erzeugnis zu berücksichtigen. Die berechneten Intervalle sind zur Gewährleistung der Ausfallsicherheit als Obergrenze einzuhalten. Ebenso können entsprechende Untergrenzen vorgegeben werden, für die vorzeitige Wartungsvorgänge ausgeschlossen sind.

⁶ Es wird angenommen, dass die Dreiecksungleichung der Rüstzeitmatrix gilt. Damit ist es per Definition immer am günstigsten direkt von e_1 auf e_2 zu wechseln.

⁷ Die Tätigkeiten können den Bereichen des Abrüstens, Aufrüstens, Probelaufs und der Nachbereitung zugeordnet werden. [Mis96, S.1806–1808].

⁸ Es wird angenommen, dass die Menge der Rüstzustände durch die Menge der Erzeugnisse, erweitert um den Zustand „Rüstvorgang“, definiert ist.

Hinsichtlich der qualitativen Kapazität des Lagers wird definiert, dass alle Erzeugnisse aufgenommen werden können. Der Lagerbestand ist allerdings flächen- und wertmäßig durch eine obere Schranke begrenzt. Sei kf_e der Flächenbedarf einer Mengeneinheit von Erzeugnis e im Vergleich zu einem definierten Normteil. Zur Einhaltung der Flächenrestriktion entspricht oder übersteigt die Maximalfläche zu jedem Zeitpunkt die Summe der mit den betreffenden Kapazitätsfaktoren kf_e multiplizierten Lagermengen. Bezüglich der maximalen Kapitalbindung ist die Summe der Produkte aus Lagermenge und Stückerlös maßgebend. Die quantitative Kapazität in Form von Anzahl und Umfang der Ein-/Auslagervorgänge je Zeiteinheit werden nicht beschränkt.

Im Kontext der menschlichen Arbeit als Gebrauchsfaktor werden vier unterschiedliche Kapazitätsstufen unterschieden. Diese ergeben sich als Schichtmodelle SM durch eine Teilmenge von Schichtkombinationen aus der Potenzmenge der Schichten S . Es gilt:

$$S := \{\text{Frühschicht } FS, \text{Spätschicht } SS, \text{Nachtschicht } NS\} \quad (2.9)$$

$$SM := \{\emptyset, \{FS\}, \{FS, SS\}, \{FS, SS, NS\}\} \quad (2.10)$$

Jede Schicht stellt eine konstante Kapazität c zur Verfügung. Daher folgt:

$$\forall sm \in SM: \text{Kapazität}_{sm} := |sm| * c \quad (2.11)$$

Es wird keine detaillierte Personaleinsatzplanung⁹ vorgenommen und daher davon ausgegangen, dass in den einzelnen Schichten Teams gebildet wurden, welche die notwendigen Aufgaben ohne Einschränkung bewältigen können. In diesem Fall ist die qualitative Kapazität zu vernachlässigen. Die quantitative Kapazität wird je Tag auf Maschinenebene durch die Wahl einer gültigen Schichtkombination (=eines Schichtmodells) definiert und gilt als notwendige Bedingung für die betreffende Maschinenkapazität.

2.1.3 Bestandteile des Zielsystems

Das unterstellte Zielsystem umfasst monetäre Größen¹⁰, welche unmittelbar vom Einsatz der gegebenen Elementarfaktoren abhängen. Der korrespondierende Gewinn, welcher sich aus der Differenz von Erlös und Kosten ergibt, kann erst definiert werden,

⁹ Details zur Personaleinsatzplanung finden sich beispielsweise in [Bod05, S.52–57].

¹⁰ Zeitbezogene Zielgrößen (z. B. Minimierung der Durchlaufzeit) sind i. A. nicht dazu geeignet die ökonomische Leistung des Produktionssystems möglichst vollständig zu beschreiben (vgl. [Brü10, S.18]).

wenn das zugrunde gelegte Zeitmodell bekannt ist. „Ein Zeitmodell bildet die zeitliche Struktur ab, bezüglich der in einer PPS-Aufgabe Aussagen über einen bestimmten Typ von Erzeugnissen und Zuständen des Produktionssystems getroffen werden sollen bzw. können“ [Dan09b, S.46]. Die zeitliche Betrachtung erfolgt auf Basis einer diskreten Zeitstruktur, deren Granularität durch die Anzahl und Variabilität der Perioden bestimmt wird, die den betrachteten Horizont in überschneidungsfreie Elemente einteilt. Wenn davon ausgegangen wird, dass Ereignisse im Produktionssystem nur zu bestimmten Zeitpunkten erfasst werden können und das Zeitmodell an diesen ausgerichtet wurde, so ergeben sich die monetären Größen für eine beliebige Periode p als Resultat der Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen (Abschnitt 2.1.4) wie folgt:

Monetäre Größe	Erläuterung
Erlös (E_p)	Ein Erlös tritt immer dann auf, wenn in der betreffenden Periode ein Bedarf in Form (mindestens) einer angemeldeten Kundenbestellung vorliegt. Die Höhe des Erlöses E_p ergibt sich aus den kumulierten Bedarfsmengen bezüglich p , welche mit dem jeweiligen erzeugnisabhängigen Stückerlös multipliziert wurden.
Schichtkosten (SK_p)	Zur Produktion nachgefragter Erzeugnisse wird Personalkapazität benötigt, welche in Form gültiger Schichtkombinationen verfügbar ist. Die Kosten der Kombinationen nehmen bezüglich bereitgestellter Kapazität überproportional zu. SK_p folgt in Abhängigkeit des betreffenden Tags (Werk-/Wochenend-/Feiertag) aus den summierten Kosten der bzgl. p gewählten Schichten je Maschine.
Produktionskosten (PK_p)	Produktionskosten zur Herstellung einer Einheit eines bestimmten Erzeugnisses ergeben sich (soweit nicht schon durch Schichtkosten abgedeckt) infolge des notwendigen Betriebsstoffeinsatzes um den Produktionsprozess der betreffenden Maschine für die erzeugnisabhängige Taktzeit aufrechtzuerhalten. Nach [Beu96, S.1503] sind hierbei Energieträger sowie Kühl- und Schmierstoffe zu berücksichtigen. Die Summe der Kosten infolge beanspruchter Betriebsmittel in p definiert PK_p .
Lagerhaltungskosten (LK_p)	Erzeugnisse die vor dem betreffenden Bedarfstermin fertiggestellt werden sind zu lagern. Je Periode entstehen Bestandskosten zur Haltung und Pflege der Bestände (z. B. Kapitalbindungskosten) sowie Handlingkosten (verursacht durch Ein-/ Um- und Ausla-

	<p>gervorgänge)¹¹ [Rie96, S.1041]. Übernehmen externe Logistikdienstleister die Lageraufgabe sind Kapitalbindungskosten und variable Dienstleistungskosten zu betrachten. LK_p entspricht der Summe aller erzeugnisabhängigen Lagerkosten bezüglich p.</p>
<p>Verzugskosten (VK_p)</p>	<p>Durch die kundenspezifischen Rahmenvereinbarungen wurde die Belieferung für gegebene Grenzen der Bedarfsanmeldung zugesichert. Werden Liefertermine dennoch nicht eingehalten entstehen pro Periode und Mengeneinheit erzeugnisspezifische Verzugskosten bis der Bedarf erfüllt ist¹². Für Periode p folgen die Kosten als Summe aller betreffenden erzeugnisabhängigen Verzugskosten.</p>
<p>Rüstkosten (RK_p)</p>	<p>Findet ein Rüstvorgang in einer Periode statt, so entstehen durch den Wert des Faktoreinsatzes (Betriebsstoffe, Werkzeuge oder insb. im Fall der zerstörenden Werkstückprüfung Prüfmittel) direkte Rüstkosten. Indirekte Kosten (z. B. Personal- oder Opportunitätskosten) werden bereits durch die Modellierung der Schichtkosten berücksichtigt (vgl. [Mis96, S.1808–1809]). Darüber hinaus werden die personalunabhängigen Mehrkosten durch Minderleistung in der Losanlaufzeit hinzugerechnet¹³. Die Gesamtheit aller Rüstkosten einer Periode p resultieren in RK_p.</p>
<p>Wartungskosten (WK_p)</p>	<p>Wird die Wartung durch anwesendes Personal durchgeführt, so fallen lediglich maschinenabhängige Material- und Betriebsstoffkosten an, da die Bearbeitungs- sowie Opportunitätskosten bereits in die Schichtkosten eingehen. Im Fall externer Wartungsdienstleister ist der vertraglich geregelte Kostensatz je Wartung in Abhängigkeit der betreffenden Maschine zu berücksichtigen. Die Wartungskosten aller Maschinen hinsichtlich p bestimmen WK_p.</p>

Tabelle 2: Übersicht der monetären Zielgrößen

¹¹ Lagerkapazitätskosten (z. B. Abschreibungen) weisen fixen Charakter auf und werden vernachlässigt.

¹² Verzugskosten können kundenspezifisch je Rahmenvertrag vereinbart sein. Es wird jedoch abstrahiert und lediglich der mittlere Kostensatz betrachtet, da keine Priorisierung einzelner Kunden in der Planung vorgenommen werden soll. Bei Bedarf ist der Zielfunktionswert im Nachhinein zu korrigieren.

¹³ Es wird unterstellt, dass ein Los größer als die Produktionsmenge innerhalb der Losanlaufphase ist. Damit können personalunabhängige Mehrkosten (z. B. durch erhöhten Ausschuss) den Rüstkosten hinzugerechnet werden [Ada98, S.478].

Der Gewinn G für den durch Periode p_1 und p_n begrenzten Zeitraum ist durch folgende Verknüpfung der genannten Bestandteile des Zielsystems zu bestimmen¹⁴:

$$G := \sum_{p=1}^n (E_p - SK_p - PK_p - LK_p - VK_p - RK_p - WK_p) \rightarrow \max \quad (2.12)$$

Unter der Annahme das Kundenbedarfe grundsätzlich erfüllt werden handelt es sich beim Erlös um eine gegebene Konstante. Damit fokussiert die Gewinnmaximierung auf die Minimierung der Summe aller monetären Kostengrößen. In diesem Zusammenhang können die Schichtkosten als Hauptbestandteil betrachtet werden. Dies resultiert nicht ausschließlich aus tendenziell hohen Personalkosten, sondern auch durch einen gegebenenfalls erheblichen Anteil an indirekten Rüst- und Wartungskosten. Die Produktion der Erzeugnisse sollte daher unter Einhaltung der Liefertermine und der produktionsbezogenen Restriktionen so erfolgen, dass Verlustzeiten minimiert und zur Bedarfsdeckung möglichst kostengünstiges Kapazitätsangebot genutzt wird.

2.1.4 Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsbestimmung als interdependente Teilprobleme

Die Bedeutung dieser Teilplanungsschritte ist vom Grad der Produktstandardisierung abhängig und wird bei dem Repetitionstyp der Serien- und Sortenfertigung als hoch erachtet [DSV97, S.17]. Damit bilden sie die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Variablen zur Zielerreichung und werden zunächst inhaltlich abgegrenzt. Die Losgröße definiert die Anzahl an Mengeneinheiten einer Produktart, die als zusammenhängender Posten gefertigt werden soll [Bog96, S.1142]. Im Rahmen der Reihenfolgeplanung werden unter Einhaltung aller gegebenen Restriktionen die Aufträge den zur Verfügung stehenden Maschinen zeitlich zugeordnet (vgl. [DSV97, S.16]). Der Kapazitätsplanung obliegt es, angebotene und nachgefragte Kapazität zu harmonisieren (vgl. [Zäp01, S.190–193]). Die sukzessive Betrachtung¹⁵ der isolierten Teilschritte, wie es für konventionelle PPS-Systeme¹⁶ üblich ist, vernachlässigt allerdings die reziproken Interdepen-

¹⁴ Der Gewinn entspricht damit nicht dem Betriebsergebnis im Sinne der Kosten- und Leistungsrechnung, da nicht alle relevanten, monetären Größen des betrieblichen Leistungserstellungsprozess Berücksichtigung finden (vgl. [Moe02]).

¹⁵ Teilaufgaben werden nacheinander gelöst, wobei die Ergebnisse vorhergehender Teilprobleme jeweils als Input für die nachfolgenden Probleme gelten.

¹⁶ Aufteilung der PPS in die Ebenen der Produktionsprogramm-, Mengen-, Losgrößen-, Termin/ Kapazitäts- und Reihenfolgeplanung oder ähnliche Oberbegriffe (vgl. z. B. [Tem05, S.278], [Zäp01, S.41], [DSV97, S.18]).

denzen. Dies motiviert die sich anschließende Erläuterung der einzelnen Aufgaben mit deren wechselseitigen Abhängigkeiten sowie monetären Auswirkungen auf das Zielsystem (Abschnitt 2.1.3) bei gegebenen Elementarfaktoren (Abschnitt 2.1.2).

Die Losgrößen unterliegen infolge einzuhaltender Wartungsintervalle der heterogenen Maschinen oberen Schranken, welche je nach Auslastung des Lagers (mengen- und wertmäßig) gegebenenfalls zusätzlich restringiert sind. Bei der Fertigung eines beliebigen Erzeugnistyps können in Bezug auf die Losgröße zwei Kostenarten unterschieden werden. Dabei handelt es sich zum einen um Kosten die von der Anzahl der gefertigten Erzeugnisse abhängen (losabhängig) und zum anderen um jene die mengenunabhängig (losfix) anfallen [Dan97, S.346]. Neben den klassischen Determinanten der Lager- und Rüstkosten¹⁷ sind infolge der genannten Interdependenzen mittelbar alle definierten Kostengrößen zur Bestimmung der optimalen Lose relevant. Wird beispielsweise die Reihenfolgeplanung vernachlässigt und damit keine Maschinenzuordnung durchgeführt, sind die Losgrößen nicht in deren Abhängigkeit, sondern nur unter Verwendung von Durchschnittswerten ermittelbar. Daher ist davon auszugehen, dass teilweise Lose unnötig auf weniger gut geeigneten Maschinen produziert werden, was sich in zusätzlichen Produktions- und Wartungskosten manifestiert. Bleibt dagegen die Kapazitätsplanung unberücksichtigt, so würden optimale Lose unter der Annahme unbeschränkter Kapazitäten mit zeitinvarianten Kosten bestimmt. Dies kann nachgelagert entweder besonders kostenintensive Schichtkombinationen erfordern oder sogar bei Ausnutzung des maximalen Kapazitätsangebots die fristgerechte Erfüllung der Bedarfe verhindern. Ist ein gültiger Plan durch Vorproduktion möglich, fallen zusätzliche Lagerkosten an.

Bei dem Teilschritt der Reihenfolgeplanung sind hinsichtlich der Elementarfaktoren die ergebnisabhängigen Produktionsfähigkeiten der Maschinen sowie die von der Auftragsanordnung ausgehenden Rüstzeiten und –kosten zu berücksichtigen. Während Erstere die möglichen Produktionsreihenfolgen je Maschine beschränken, sind Letztere die einzigen unmittelbar verwertbaren Zielgrößen. Deren ausschließliche Optimierung genügt allerdings nicht der Gewinnmaximierung, was nachfolgend durch die Beeinflussung angrenzender Teilaufgaben aufgezeigt wird. Findet keine simultane Bestimmung der Losgrößen statt, werden die Produktionsreihenfolgen ohne Kenntnis der jeweiligen Auflagehäufigkeiten und Mengen berechnet, sodass lediglich eine fixe, rüstaufwandsorientierte Erzeugnisfolge je Maschine resultiert. Damit sind die Losgrößen nachgela-

¹⁷ Eine grafische Veranschaulichung des resultierenden Gesamtkostenverlaufs der beiden isolierten Größen findet sich u. a. in [Bog96, S.1147]. Es ist jedoch anzumerken, dass auch die Auswirkungen der Rüstvorgänge erheblich von der Reihenfolgeplanung abhängen und damit ein über die reine Losgrößenoptimierung (welche ohne bekannte Rüstzeiten-/kosten ggf. fälschlicherweise eine Produktion nahe an den Bedarfsterminen als wirtschaftlich erachtet) hinausgehendes Problem vorliegt.

gert an der bedarfserfüllenden Produktion für die gegebenen Reihenfolgen auszurichten. Wegen des signifikanten Rüstaufwands je Vorgang ist, auch wenn der Erzeugnistyp gerade nicht oder nur in geringem Umfang benötigt wird, von einer vergleichsweise großen Fertigungsmenge und einer Zunahme an Lagerkosten auszugehen. Durch die begrenzten Kapazitäten mit gestaffelten Kosten führt dies tendenziell in einigen Zeitabschnitten zu kleineren Losen (steigenden Rüstkosten) sowie dem verstärkten Einsatz alternativer Maschinen (zusätzliche Produktions- und Wartungskosten). Im Extremfall kann die Nachfrage dennoch nicht erfüllt werden und es entstehen Verzugskosten, welche bei der integrierten Losgrößenplanung vermeidbar sind. Wird dagegen die Reihenfolgeplanung unabhängig von der Festlegung resultierender Schichtkombinationen vorgenommen, ist die optimale Abfolge der Lose nicht oder nur mit zusätzlichen Schichtkosten (und damit i. A. auch Lagerkosten) durchsetzbar.

Im Kontext der Kapazitätsplanung sind die Determinanten des Kapazitätsangebots die gegebenen Gebrauchsfaktoren in Form personeller Ressourcen bzw. gültiger Schichtkombinationen und heterogener, paralleler Maschinen. Kapazitätsnachfrage leitet sich direkt aus den Kundenaufträgen ab, deren Mindestbestellmenge bereits bekannt ist. Um das Ziel der Harmonisierung von Angebot und Nachfrage im Sinne der Wirtschaftlichkeit des Zielsystems zu erreichen, sind die limitierten Lagerressourcen zielführend einzusetzen. Nach Zäpfel existieren dazu unter anderem die in Abbildung 6 gezeigten produktionswirtschaftlichen Möglichkeiten.

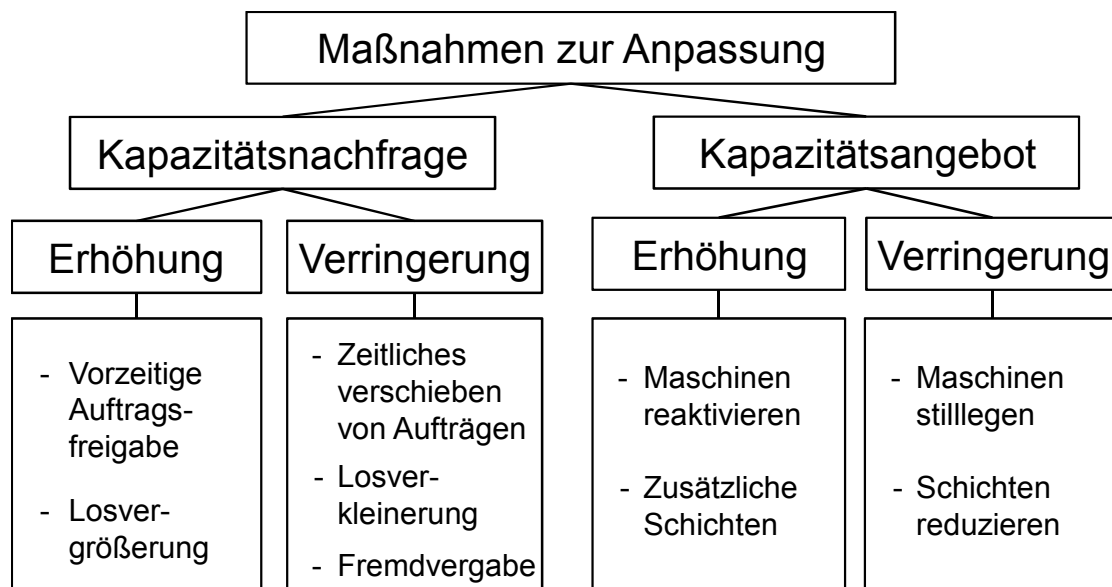


Abbildung 6: Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (vgl. [Zäp01, S.192])

Damit wird deutlich, dass neben Schichtkosten weitere monetäre Größen im Zusammenhang mit den korrespondierenden Teilplanungsschritten relevant sind. Erfolgt die Planung der Kapazitäten ohne Einbeziehung von Losgrößen resultieren Schichtkombinationen, welche den zeitlichen Versatz von Produktion und Nachfrage durch Auftragsbündelung unzureichend abbilden. Dies schränkt die Wahl der Losgrößen stark ein und verursacht damit unnötige Rüst-, Lager-, sowie ggf. Verzugskosten. Wird die Kapazitätsplanung ohne Betrachtung der Reihenfolge durchgeführt, war der Kapazitätsbedarf als Planungsgrundlage wegen reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten und maschinenabhängiger Bearbeitungszeiten unbekannt. Folglich müssen die Reihenfolgen der Lose suboptimal gewählt werden, was den Rüst- und Produktionsaufwand erhöht, eine fristgerechte Bereitstellung aller Bedarfe des Planungshorizonts dennoch nicht garantiert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die einzelnen monetären Größen durch die Auswirkungen der voneinander abhängenden Losgrößen-/ Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen wechselseitig beeinflusst werden. Eine unzureichende Beachtung der Zusammenhänge führt daher zu gewinnreduzierenden Planungsergebnissen.

2.1.5 Rollierende Planung zur Steuerung bei offenem Horizont

Die „Planung kann als gedankliche Vorwegnahme künftigen Geschehens durch systematische Entscheidungsvorbereitung und Entscheidungsfällung verstanden werden“ [Hah96, S.1522]. Im Kontext der operativen Produktionsplanung und Steuerung gilt es dabei Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen im Sinne des Zielsystems (siehe Abschnitt 2.1.3) zu treffen. Die Planungsaufgabe in Form eines Totalmodells einmalig zu lösen widerspricht allerdings der Wirtschaftlichkeit (vgl. [Sch01, S.20–21]. Nach Scholl lässt sich diese Aussage auf die beiden Aspekte des dynamischen Planungsumfelds und des im Allgemeinen zeitlich unbegrenzten unternehmerischen Vorhabens zurückführen. Die Dynamik zeigt sich neben dem in Abschnitt 2.1.1 vorgestellten Ablauf der Bedarfsanmeldung auch im Rahmen des Produktionsprozesses (z. B. durch variierende Bearbeitungszeiten, Maschinenausfälle, o. ä.). Zu jedem Zeitpunkt des zugrunde liegenden Zeitmodells kann es daher zu Planabweichungen kommen, auf die mit gewinnorientierten Plananpassungen zu reagieren ist. Andernfalls resultiert eine Divergenz zwischen realer und geplanter Situation, was die Zweckmäßigkeit der Umsetzung aller weiteren geplanten Handlungen verneint. Diese Problematik verschärft sich mit steigender Länge des Planungshorizonts, welcher im Fall des Totalmodells keiner absehbaren zeitlichen Beschränkung unterliegt. Unterstellt man weiter eine modellbasierte Planungskomplexität welche von der Länge des betrachteten Horizonts abhängt, verursacht dies entweder enormen Aufwand oder führt zur Unlösbarkeit.

Damit wird insgesamt die Notwendigkeit der zeitlichen Koordination von Plänen und Plananpassungen deutlich.

Im Konzept der rollierenden Planung wird daher zum Entscheidungszeitpunkt ein Plan für einen Teil des unbeschränkten Gesamthorizonts GH bestimmt. Dieser Teilhorizont wird als Planungshorizont PH bezeichnet und es gilt $PH \ll GH$. Da keine eingefrorene Zone unterstellt wird, sind die in Bezug auf PH getroffenen Entscheidungen jedoch nur für den Teilbereich verbindlich, der sich über den Zeitraum der aktuellen bis zur kommenden Planung erstreckt. Diese Dauer wird als Planabstand PA definiert und umfasst mindestens eine Periode (ein Tag), welche infolge der Betrachtung von Schichtkombinationen weiter unterteilt ist. Alle zeitlich darüber hinausgehenden Entscheidungen sind lediglich vorläufiger Natur und werden in kommenden Planungszyklen ggf. revidiert. Die Betrachtung der Perioden des Planungshorizonts größer dem Planabstand vermeidet jedoch durch Antizipation zukünftiger Bedarfe unrealistische lokale Optima im zu fixierenden Teilbereich und bietet darüber hinaus eine Vorschau für angrenzende Planungsaufgaben. Abbildung 7 illustriert den beschriebenen Planungsprozess.

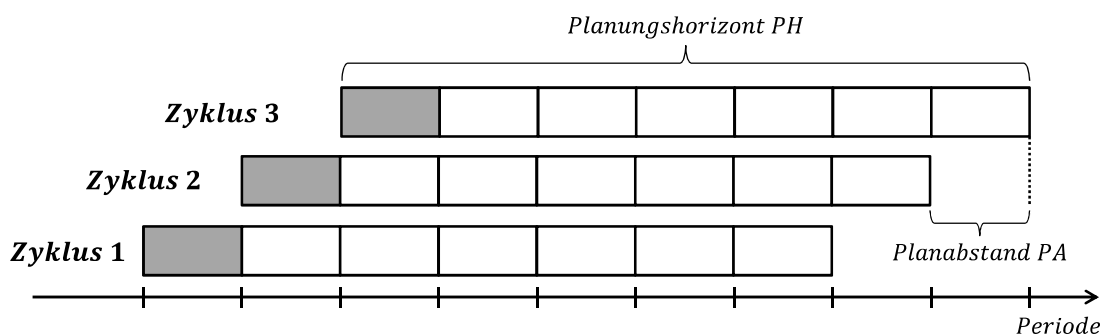


Abbildung 7: Ablauf der rollierenden Planung

Der tatsächlich fixierte bzw. umgesetzte Plan ergibt sich für eine beliebige Anzahl von Planungszyklen PZ und der korrespondierenden Menge historischer Pläne $HP_{pZ,p}$ mit periodenbezogenen Entscheidungen durch:

$$[HP_{1,0}, \dots, HP_{1,PA-1}] \oplus [HP_{2,0}, \dots, HP_{2,PA-1}] \oplus \dots \oplus [HP_{PZ,0}, \dots, HP_{PZ,PA-1}] \quad (2.13)$$

Damit wird deutlich, dass weniger die Planung im Fokus der Betrachtung steht, sondern vielmehr die regelmäßige Anpassung der Entscheidungen der nächsten PA Perioden. Dieses Vorgehen kann als Steuerung (mit planendem Anteil) bezeichnet werden. „Steuerung ist ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Inputgrößen die Outputgrößen aufgrund der Gesetzmäßigkeiten des Systems beeinflussen“ [DIN19226].

Der tatsächliche Gewinn als Ergebnis der gesteuerten Größen folgt durch Auswertung des Zielsystems anhand der realisierten Teilpläne. Das Optimum als obere Schranke ist lediglich ex post durch das Ergebnis des Totalmodells mit vollständigen Informationen gegeben. Ziel der Steuerung ist die Minimierung der Gewinnabweichung bezüglich genannter Schranke. Aufgrund der Bedeutung von Bedarfsdynamik im Kontext der Steuerungsaufgabe wird dieser Aspekt in Abschnitt 2.2 ausgegliedert und ausführlich betrachtet.

2.2 Bedarfsdynamik im Kontext der Steuerungsaufgabe

Nachdem der zugrunde liegende Betrachtungsgegenstand definiert wurde, schließt sich nachfolgend die Erläuterung der Steuerungsproblematik in einer dynamischen Umgebung an. Dazu wird zunächst durch Abschnitt 2.2.1 die Bedarfsdynamik motiviert und deren Art differenziert dargestellt. Im Anschluss erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Auswirkung möglicher Formen von Bedarfsdynamik auf die gewinnmaximierenden, produktionsbezogenen Entscheidungen. Dies umfasst in Abschnitt 2.2.2 die Folgen unterschiedlicher Periodenbedarfe sowie in Abschnitt 2.2.3 die Einflussnahme der Bedarfsänderungen zwischen Planungszyklen.

2.2.1 Charakteristik der kundenseitigen Dynamik

Mit dem Ziel die planungsrelevante Bedarfsdynamik möglichst präzise zu beschreiben, werden zunächst deren wesentlichen Ursachen diskutiert, da diese ggf. im Zusammenhang mit einer spezifischen Nachfrageschwankung stehen. Auf der Ebene des einzelnen Kunden als Bestandteil einer Lieferkette lassen sich die Ursachen den in Abbildung 8 dargestellten Kategorien zuordnen, welche nachfolgend beispielhaft erläutert werden.

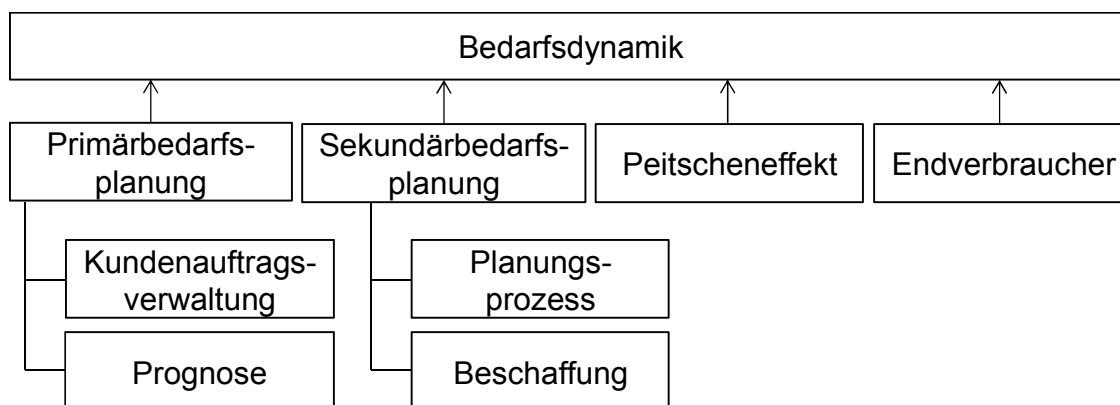


Abbildung 8: Ursachen kundenseitiger Bedarfsdynamik (vgl. [Bar06, S.6–9])

Eine der zentralen Schwierigkeiten in der Planung stellt die grundsätzliche Unvollkommenheit der planungsrelevanten Informationen dar, sodass im Kontext der Primärbedarfsprognose auch bei einer adäquaten Auswahl und Parametrierung der Methode von einem Vorhersagefehler auszugehen ist (vgl. [Sch01, S.13]). Folglich ist die Absatzprognose mehrfach anzupassen und damit jeweils auch die Sekundärbedarfsplanung zu aktualisieren. Liegt zwischen Kunde und Lieferant keine Vereinbarung hinsichtlich einer eingefrorenen Zone vor, so kann dies ebenfalls zu schwankenden Primärbedarfen führen, da der Planer in der unsicheren Situation aufgrund seiner Erfahrung handelt (vgl. [Bar06, S.8]). Neben den genannten Einflussfaktoren ist auch die Sekundärbedarfsplanung selbst Ursprung von Bedarfsdynamik. Im Fall des Bedarfsplanungsprozesses nennt Barthel den Bereich der Datendefinition in Form von (andauernden) Stücklistenfehlern sowie den Bereich der Bedarfsauflösung. Hierbei sind Fehler durch eine rein verbrauchsgesteuerte Disposition und ungenaue Bestände (durch Schwund oder Störprozesse des Produktionsablaufs wie z. B. variierende Prozessdauern, Ausschussquoten, Kapazitätsausfälle) begründet (siehe auch [Geb09, S.21–24]). Von besonderer Bedeutung ist der Prozess der Beschaffung. Grundsätzlich resultieren die Bestellmengen durch die Stücklistenauflösung. Die Mengen werden jedoch durch strategisches Verhalten beeinflusst. Der „Engpasspoker“ bezeichnet beispielsweise die (im Rahmen der Flexibilität) bewusst überhöhte Bestellanmeldung vor dem Hintergrund möglicher Liefer-schwierigkeiten. Es wird davon ausgegangen, dass in diesem Fall eine nach Auftragsvolumen kontingentierte Zuteilung umgesetzt wird (vgl. [KZ04, S.134–145]). Ein weiterer Aspekt resultiert aus den Bestands- und Umsatzzielen. Diese Größen werden nur zu bestimmten (häufig bekannten) Zeitpunkten bewertet und führen daher zu kurzfristiger Dynamik (vgl. [Jac06, S.31]). Häufig genannte alternative Ursachen sind auch das Bestellen in Losgrößen, das Ausnutzen von Preisschwankungen oder die Auftragsbündelung zur Stückkostenreduzierung. Ferner wirkt je nach Position des betrachteten Unternehmens in der Lieferkette der Peitscheneffekt als Multiplikator der Bedarfsdynamik.

Zusammenfassend kann aus der Perspektive des Lieferanten gesagt werden, dass mit erheblicher Bedarfsunsicherheit zu rechnen ist, da kundenseitige Dynamik vielfältig begründet und nur durch Rahmenvertragsvereinbarungen limitiert wird. Zudem fällt deren Aushandlung aufgrund des Wettbewerbsdrucks häufig zugunsten der Kunden aus, sodass verbindliche Bestellungen nur für ein bis maximal drei Tage bekannt und darüber hinaus flexibel (d. h. in begrenztem aber erheblichen Ausmaß und ohne weitere planerische Kooperation) sowie kostenlos anpassbar sind (vgl. bspw. [Bro11, S.6], [VDA5009, S.15]). Durch die genannten Beispielursachen wird allerdings deutlich, dass Schwankungen nicht völlig zufällig erfolgen, sondern in Abhängigkeit deren Auslöser (ggf. unregelmäßig) wiederholt und mit teilweise ähnlichem Verlauf auftreten. In diesem Zusammenhang lassen sich zwei beobachtbare Aspekte unterscheiden. Zum einen

handelt es sich um die zeitliche Abfolge endgültiger Bestellmengen (verbrauchsorientierte Schwankung) und zum anderen um die Sequenz der Mengen-/ Terminänderungen einer Bestellung von dessen Anmeldung bis zur Fixierung (bedarfsorientierte Schwankung)¹⁸. Zur grafischen Veranschaulichung typischer Schwankungsbilder sei an Abschnitt 2.3.1, respektive dort genannte Quellen verwiesen. Hinsichtlich der Auswirkung von Bedarfsdynamik sind deren möglichen Arten in Form von unterschiedlichen Periodenbedarfen in einem Planungshorizont sowie von Bestelländerungen zwischen Planungszyklen zu differenzieren, welche nachfolgend im Kontext der definierten Steuerungsaufgabe detailliert dargestellt werden.

2.2.2 Auswirkungen innerhalb eines Planungszyklus

Das Potenzial der Betrachtung eines Planungshorizonts PH besteht darin, vorzeitig produktionsbezogene Aktivitäten umzusetzen, welche zur Herstellung von Erzeugnissen und damit zu entsprechenden Lagerbeständen oder zu produktionsvorbereitenden Maßnahmen in Form von Wartungs- oder Rüstvorgängen führen. Die hierbei entstehenden Kosten weisen den Charakter einer kurzfristigen Investition¹⁹ auf und sollten im Laufe des Planungshorizonts zu einem Gewinn führen, der das Ergebnis spätestmöglicher Produktion übersteigt. Je kleiner der Planungshorizont ist, desto stärker wird die Realisierung der Potenziale eingeschränkt. Im Extremfall der dynamischen Planung werden je Planungszyklus nur die nächsten, für den fortlaufenden Betrieb des Produktionssystems notwendigen Perioden betrachtet [Neu08, S.39]. Die Zeit um auf eine beliebige Bestellung zu reagieren, d. h. bei jeweils gegebener Bedarfsmenge und Bedarfstermin die Losgrößen-/ Reihenfolgen und Kapazitäten für den betrachteten Planungshorizont anzupassen, ist wegen fehlender bzw. unzureichender Antizipation der Zukunft minimal. Damit wird ein lokales Optimum angestrebt, indem eine kurzzeitige Gewinnmaximierung zulasten der längerfristigen Ergebnisse erfolgt. Jeder auftretende Bedarf der die maximale Kapazität hinsichtlich PH übersteigt, führt infolge zu Verzug. Die Güte der Steuerung bei unterschiedlichen Periodenbedarfen hängt demnach maßgeblich von der Länge des Planungshorizonts ab, für den die angemeldeten Bestellungen eingehen. Mit Hilfe von Abbildung 9 sollen die Auswirkungen unterschiedlich dimensionierter Horizonte an einem einfachen Beispiel verdeutlicht und darauf aufbauend detailliert werden.

¹⁸ Die Begriffe sind aufgrund einer Analogie zur Bedeutung im Kontext der verbrauchs-/ bedarfsgesteuerten Disposition (vgl. [DSV97, S.11f]) gewählt, dürfen jedoch nicht mit diesen gleichgesetzt werden.

¹⁹ Eine Investition ist definiert als „Verwendung finanzieller Mittel, die zu einem Zugang an Sachanlagen, Finanzanlagen, Gegenständen des Umlaufvermögens und/oder immateriellen [...] Vermögensgegenständen führt“ [LS96, S.786].

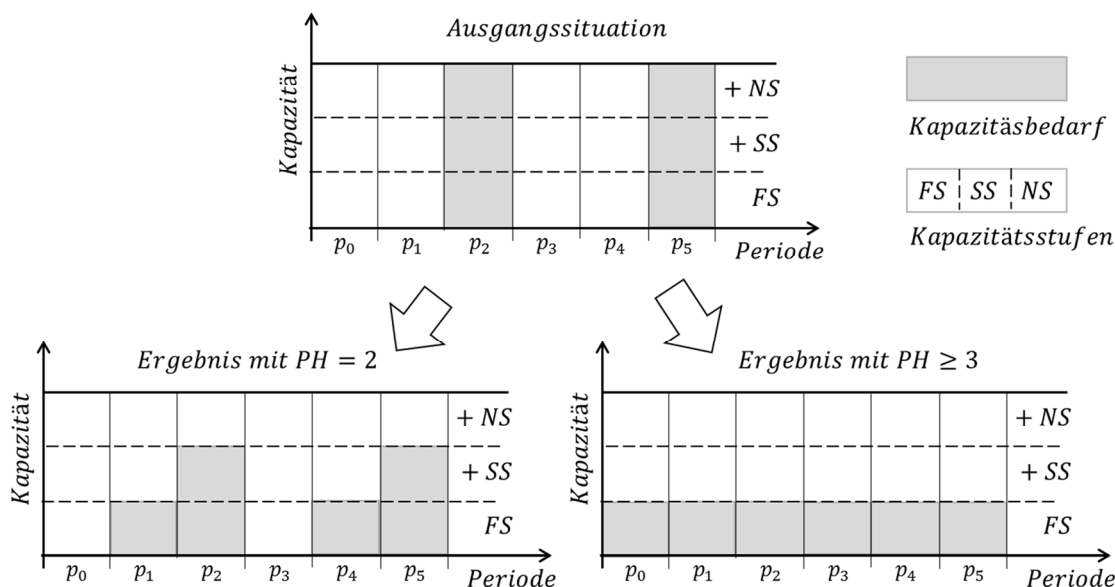


Abbildung 9: Auswirkung unterschiedlich dimensionierter Planungshorizonte

Seien die Bestellungen so gewählt, dass deren kumulierte Bestellmenge genau in einer Planungsperiode herstellbar ist. Ferner wird angenommen, dass die Liefertermine jeweils drei Perioden auseinanderliegen. Die resultierende, zwischen keiner und maximaler Nachfrage, alternierende Bedarfsituation im Gesamthorizont lässt nach dem in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen Zielsystem keine optimale Bedarfserfüllung ohne Zwischenlagerung zu. Die Vorproduktion ist durchzuführen, solange Lager- und Produktionskapazität bereitsteht und die durch Lagerung bis zum Liefertermin entstehenden Kosten durch Einsparungen anderer monetärer Größen (insbesondere Schichtkosten) überkompensiert werden können. Es ist anzumerken, dass jede Schicht fixe Kosten verursacht, weshalb auch bei geringen Bedarfen eine Vorproduktion zur Ausnutzung der vorhandenen Kapazität durchzuführen ist. Schichtkosten können zum einen direkt, d. h. durch die Vermeidung von Rüstzeiten (größere Lose, andere Reihenfolge), Wartungszeiten und Produktionszeiten (geeignete Zuordnung der Lose zu den heterogenen Maschinen) oder indirekt durch die Verlagerung von Produktions-, Rüst- oder Wartungsvorgängen in eine günstigere Schicht gespart werden. Damit wird deutlich, dass kein reiner Kapazitätsausgleich, sondern stets eine zielsystembasierte Abwägung vorzeitiger produktionsbezogener Aktivitäten durchzuführen ist. Infolgedessen kann zur Beurteilung der Bestände im Sinne der Gewinnmaximierung keine reine Mengenbetrachtung vorgenommen werden, da die Erzeugung des jeweiligen Bestands ggf. signifikant unterschiedliche Kosten verursacht hat. Hinsichtlich des betrachteten Beispiels führt ein Planungshorizont mit lediglich einer Periode zur Produktion der Erzeugnisse analog zur dargestellten Ausgangssituation. Im Fall von zwei Perioden beschränkt sich die Vorproduktion

auf diesen Horizont, sodass die Absatzmöglichkeiten jeweils durch zwei Frühschichten und eine Spätschicht realisiert werden. Das Optimum von jeweils drei Frühschichten bleibt unerreicht, bis der Planungshorizont mindestens drei Perioden überspannt.

Im Allgemeinen hängt die zur Gewinnmaximierung notwendige Länge des Planungshorizonts entscheidend von der Parametrierung der Steuerungsaufgabe ab. Dies gilt insbesondere für die Kostenparameter. So beeinflusst beispielsweise die Höhe der Lagerkosten die Anzahl der Perioden, für die mögliche Schichtkosteneinsparungen durch Vorproduktion maximal realisierbar sind (vgl. [DD09, S.42]). Diese Zeitspanne wird zusätzlich durch die Art der Bedarfe (Verhältnis von Maximal- zu Durchschnittsmenge) und die Spezifikation möglicher Rüstvorgänge bestimmt. Allerdings wirken sich auch restringierende Parameter (Lagermengen, Kapitalbindung) sowie die Heterogenität der parallelen Maschinen (z. B. durch unterschiedliche Taktzeiten eines Erzeugnisses oder Wartungsintervalle) auf das Potenzial des Planungshorizonts aus. Die Zweckmäßigkeit produktionsbezogene Aktivitäten auch im Kontext von Bedarfsänderungen vorzeitig auszuführen bleibt bisher allerdings offen.

2.2.3 Auswirkungen zwischen Planungszyklen

Ein ausreichend dimensionierter Planungshorizont ist als notwendige, aber keinesfalls hinreichende Bedingung zur Gewinnmaximierung anzusehen, was nachfolgend durch die Einflussnahme der Bedarfsdynamik in Form von Bestellmengen- und Bestellterminänderungen auf die Realisierung der Potenziale (vgl. Abschnitt 2.2.2) aufgezeigt wird. Sei in jedem Planungszyklus durch Berechnung der Losgrößen-, Reihenfolgen und Kapazitäten ein Plan bestimmt, welcher zum Planungszeitpunkt für einen Horizont PH den maximalen Gewinn ermöglicht, wobei zur Zielerreichung von $PH > H1$ ausgegangen werden kann. Demzufolge basiert der planende Anteil der Steuerung auf (größtenteils) unsicheren Bedarfen und das optimale Ergebnis wird nur realisiert, wenn die zugrunde gelegten Bestelldaten bis zu deren Fixierung ohne Änderung fortgeschrieben werden. Treten Bestelländerungen auf, wurden im Allgemeinen Entscheidungen umgesetzt, welche zur Reduktion des realisierbaren Gewinns führen. In diesem Kontext sind bezüglich den produktionsbezogenen Aktivitäten zwei Fälle zu unterscheiden:

- Es wurde ein Plan bestimmt, der im realisierten Teilhorizont auf den Maximalgewinn verzichtet (durch Rüstvorgänge, alternative Maschinenauswahl, bedarfsübersteigende Produktion oder vorgezogene Wartung) um diesen Verlust im Teilhorizont der Plangewinne zu überkompensieren (geringere Schicht-, Produktions-, Lager-, Verzugs-, Rüst- und Wartungskosten) was aufgrund von sich ändernden Bestellinformationen jedoch nicht oder nur teilweise möglich ist.

- Es wurde ein Plan bestimmt, der im realisierten Teilhorizont den Maximalgewinn erreicht, da alle weiteren Bedarfe durch Produktions-, Rüst- und Wartungsvorgänge im Horizont der Plangewinne gewinnmaximal erfüllbar scheinen, was für die endgültigen Bestellmengen/-termine jedoch nicht der Fall ist.

Die optimalen Anpassungsentscheidungen resultieren aus der Neuplanung der Losgrößen, Reihenfolgen sowie Kapazitäten nach bekannt gewordenen, kundenseitigen Bedarfsüber-/unterschätzungen. Zum Anpassungszeitpunkt sind bereits produktionsbezogene Entscheidungen irreversibel umgesetzt, welche auf Basis teilweise fehlerhafter Eingangsdaten getroffen wurden. Die Konsequenzen werden an den beiden möglichen Ausprägungen von realisierten Entscheidungen mit je einem Beispiel zur Bedarfsunterschätzung (a) und Bedarfsüberschätzung (b) verdeutlicht²⁰:

- **Produktionsbezogene Aktivitäten haben nicht stattgefunden**
 - a) Der Kapazitätsbedarf kann bei Vorproduktion durch eine Früh-/ Spätschichtkombination je Tag und Maschine (vgl. Abschnitt 2.1.2) gedeckt werden. Aufgrund von Bedarfsunterschätzungen wird ein Teil der Produktion jedoch vorerst aufgeschoben. Bei Bekanntwerden des höheren Bedarfs müssen Kombinationen mit teureren Nachtschichten oder Wochenendarbeit in Kauf genommen werden, um Verzug zu vermeiden.
 - b) Die gewinnmaximierende Produktion sieht die Herstellung eines Erzeugnisses an dessen Bedarfstag vor, da eine ausreichende Vergrößerung des vorherigen Loses aktuell noch möglich wäre, aber eine teurere Schichtkombination (und weitere Lagerkosten) verursacht. Nachträglich ist dies jedoch lediglich auf die Bedarfsüberschätzung zurückzuführen, sodass sich die nicht produktive Zeit unnötig erhöht hat.
- **Produktionsbezogene Aktivitäten haben stattgefunden**
 - a) Die zum aktuellen Planungszeitpunkt gewinnmaximierende Steuerung sieht die vorzeitige Produktion eines Loses aufgrund geringer Nachfrage im Nahbereich vor. Nach Bekanntwerden der Bedarfsunterschätzung bzgl. des hergestellten Erzeugnisses muss kurzfristig ein weiteres Los eingeplant werden. Um die Rüstzeit an einem nachfolgenden Tag erneut bereitzustellen, ist die nächstteurere Schichtkombination zu wählen.
 - b) Die bedarfserfüllende Produktion ist durch eine Frühschicht je Tag und Maschine gewinnmaximierend möglich. Aufgrund von Bedarfsüber-

²⁰ Der Begriff „Schätzung“ bezieht sich auf die unsichere Bedarfsanmeldung des Kunden. Eine Bedarfsunterschätzung entspricht entweder einer zu niedrig angenommenen Bestellmenge oder einem zu spät angenommenen Bestelltermin. Eine Bedarfsüberschätzung ist entsprechend als zu hoch angenommene Menge oder zu früh angenommenen Termin zu betrachten.

schätzungen werden jedoch zunächst teurere Schichtkombinationen gewählt. Zusätzlich entstehen Lagerkosten in voller Höhe bis zum tatsächlichen Liefertermin und darüber hinaus für die Differenz aus produzierter und tatsächlicher Menge bis zum nächsten ausreichend großen Bedarf des Erzeugnisses. Bei begrenzten Lagerressourcen können gewinnreduzierende Folgen auftreten, da die Möglichkeit der Vorproduktion anderer künftiger Bedarfe eingeschränkt wird.

Im Kontext des Vorgehensmodells aus Abschnitt 2.1.5 kann somit ein realisierter Plan entstehen, welcher zwar aus konkatenierten, zum Zeitpunkt der Planung optimalen Entscheidungen besteht, retrospektiv betrachtet jedoch keine hohe Güte aufweist²¹. Es ist anzumerken, dass Unterschätzungen im ungünstigsten Fall mengenmäßig nicht mehr aufgeholt werden können und damit zur Lieferunfähigkeit bzw. drastischen Verzugskosten führen. Ist eine bedarfserfüllende Produktion noch kurzfristig möglich, fallen meist teure Schichten an. Überschätzungen können grundsätzlich identische Folgen aufweisen, führen jedoch je nach Auslastung häufig lediglich zu höheren Bestandskosten.

2.3 Anforderungen an die Problemlösung zur Gewinnmaximierung bei bekannter Vergangenheit

Es wurde die Notwendigkeit eines ausreichend dimensionierten Planungshorizonts aufgezeigt (vgl. Abschnitt 2.2.2), was zur Steuerung auf Basis unsicherer Bestellinformationen führt. Da sich Bestelltermine und –mengen häufig bis kurz vor dessen Fixierung ändern (vgl. Abschnitt 2.2.1), reduziert dies wegen bereits realisierter produktionsbezogener Entscheidungen den möglichen Gewinn (vgl. Abschnitt 2.2.3). Auf dieser Grundlage lassen sich unmittelbar grobe Anforderungen an die Problemlösung zur gewinnmaximierenden Steuerung ableiten. Zur Zielerreichung sind zunächst die historischen Bestellinformationen bezüglich enthaltener Muster laufend zu analysieren. Erfordernisse welche diesen Aspekt der Reduktion von Bedarfsdynamik betreffen, werden in Abschnitt 2.3.1 formuliert. Unabhängig von der Analysemethodik bleibt eine erhebliche Unsicherheit hinsichtlich des Bedarfs bestehen, welche wie in Abschnitt 2.3.2 dargestellt, je Planungszyklus zu ermitteln und abzubilden ist. Bei gegebener Bedarfsunsicherheit sind weitere Anforderungen zur situationsbedingten Festlegung der Losgrößen, Reihenfolgen und Kapazitäten im Zeitablauf durch Abschnitt 2.3.3 zu definieren.

²¹ Ist die je Plananpassung unterstellte Personalflexibilität nicht gegeben, muss eine über den Planabstand hinausgehende Schichtfixierung erfolgen. Auf die Darstellung der Auswirkungen wird jedoch verzichtet, da diese lediglich ein Spezialfall des entsprechend größeren Planabstands sind. Der Unterschied besteht in der Flexibilität bzgl. geplanter aber noch nicht umgesetzter Produktionsentscheidungen.

2.3.1 Musterbasierte Analyse des kundenseitigen Bestellverhaltens

Wird ein teilweise systematisches Bestellverhalten unterstellt, ist es insbesondere im operativen Kontext nicht zweckmäßig ausschließlich von einer zugrunde liegenden theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilung auf Basis von Häufigkeiten bisher beobachteter Bestelländerungen auszugehen, um Aussagen über die Zukunft zu treffen. Das Vorgehen führt zu verzerrten Verteilungen, da diese nicht mehr nur die tatsächliche Unsicherheit abbilden, sondern ebenfalls regelmäßige Schwankungen integrieren. Damit finden Muster als Folge der undifferenzierten Betrachtung je nach Situation entweder unnötig oder unzureichend Berücksichtigung, was sich negativ im Sinne des Zielsystems auswirkt und die Bedeutsamkeit der sachgerechten Datenanalyse aufzeigt.

Für jeden Kunden existiert gemäß getroffener Annahmen eine Menge historischer Bestellverläufe. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des Analyseansatzes sind auf Basis dieser gegebenen Bestellinformationen zum Steuerungszeitpunkt, die enthaltenen verbrauchs- und bedarfsorientierten Muster²² möglichst exakt zu bestimmen. In Tabelle 3 sind die beiden unabhängigen Typen jener Regelmäßigkeiten bezüglich unterschiedlicher Komplexität (Anzahl signifikanter Wertänderungen sowie erkennbare Grundrichtung) beispielhaft dargestellt und motiviert. Im Suchprozess ist zu berücksichtigen, dass weder sämtliche Ursachen der Muster, noch deren jeweilige Länge a priori bekannt sind. Zudem können charakteristische Schwankungsverläufe zu beliebigen, sich verändernden Zeitpunkten auftreten, sodass nicht ausschließlich von festen Einflussgrößen (wie bspw. Feiertagen) auszugehen ist.

Um möglichst spezifische Muster in den Bestellinformationen der Kunden finden zu können, ist jeweils eine Aufbereitung der Daten auf Kunden-Erzeugnis-Ebene durchzuführen. Im Fall von verbrauchsorientierten Regelmäßigkeiten unterscheiden sich einzelne Ausprägungen eines Musters ggf. durch zeitabhängige, langfristig vorhandene Grundkomponenten in Form des Bedarfsniveaus, des Trends der Konjunktur sowie der Saison. Im Kontext der operativen Planung steht jedoch die Vorhersage des kurzfristigen Bestellverhaltens im Mittelpunkt der Betrachtung, weshalb diese Effekte vor der (lokalen) Mustersuche zu neutralisieren sind. Im Fall von bedarfsorientierten Regelmäßigkeiten ist außerdem zu beachten, dass unterschiedliche Periodenbedarfe (vgl. Abschnitt 2.2.1) zu initialen Bestellanmeldungen variabler Höhe führen. Damit weichen die Wertebereiche der Bestelländerungen im Allgemeinen stark voneinander ab, was bei der Suche nach Mustern geeignet Berücksichtigung finden muss.

²² Vgl. Fußnote 18.

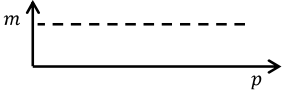
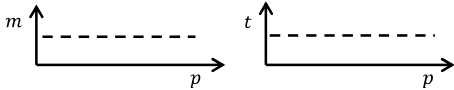

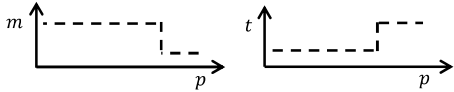
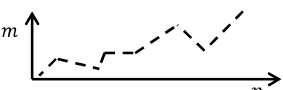
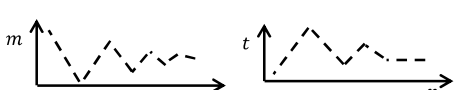

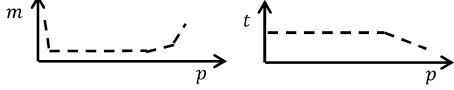
	Verbrauchsorientiertes Muster (VoM)	Bedarfsorientiertes Muster (BoM)
Keine Änderung	 <p>Beispiel: Bedarfsspitze bei geg. Kapazität</p>	 <p>Beispiel: (partiell) kein Prognosefehler</p>
Einmalige Änderung	 <p>Beispiel: Auftragsbündelung → Kostenreduktion</p>	 <p>Beispiel: Flexibilitätsausreizung wegen Lieferengpässen</p>
Mehrfache Änderung mit Trend	 <p>Beispiel: Schrittweise Angleichung auf geändertes Bedarfsniveau</p>	<p>Siehe Verbrauchsorientiert, außer Sonderfall:</p>  <p>Beispiel: Schrittweiser Übergang von Prognosen zu Aufträgen beim Kunden</p>
Mehrfache Änderung ohne Trend	 <p>Beispiel: Wochen-/Monatsprofil, „month end rallye“ (Bestands-/Umsatzziele)</p>	 <p>Beispiel: Zeitpunktabhängiges Verhalten des Planers, Unbeobachtbare wiederkehrende Einflüsse</p>

Tabelle 3: Überblick hinsichtlich zu erkennendem musterbasierten Bestellverhalten (in Anlehnung an [Bar06, S.109], [Dan09b, S.378])

Die Betrachtung der Kunden-Erzeugnis-Ebene ermöglicht einerseits präzise Aussagen über das jeweilige Bestellverhalten (da keine Aggregation vorgenommen wird), reduziert jedoch andererseits die jeweils zur Verfügung stehende Datenmenge. Um dieser Problematik beschränkter Vergangenheitsinformationen entgegenzuwirken, ist die Suche nach Mustern so zu gestalten, dass auch bei tendenziell wenigen Musterinstanzen ein positives Ergebnis erzielt werden kann.

Auch wenn systematisches Bestellverhalten angenommen wird, können sich die einzelnen Instanzen eines Musters voneinander unterscheiden. Daher muss eine Distanz bestimmt werden, welche die maximale Abweichung zwischen Entitäten eines Musters definiert. Die Schwierigkeit besteht hier in der Abwägung zwischen einer ausreichend großen (sonst wird ein Muster nicht oder nur mit unzureichender Anzahl an Instanzen gefunden) aber wiederum nicht zu großen (sonst werden u. U. auch zufällige Teilverläufe als Muster identifiziert) Maximaldistanz. In diesem Zusammenhang ist ggf. vorhandenes Erfahrungswissen geeignet zu berücksichtigen.

Unabhängig davon ob es sich um ein Muster zur Abbildung von typischer verbrauchs- oder bedarfsorientierter Schwankung handelt, sind diese nicht zeitinvariant. Aus dem Grund müssen bei geänderter Informationsgrundlage zum einen bestehende Muster angepasst und zum anderen ggf. neue Muster ermittelt werden, was zur Adaption des vermuteten Bestellverhaltens führt.

Die Suche nach genannten Regelmäßigkeiten ist ein notwendiger Schritt zur Lösung der definierten Steuerungsaufgabe. Dementsprechend gehen die erzielten Ergebnisse als Input in weitere Berechnungsschritte ein. Je nach Anwendungsfall (d. h. Dauer der Rahmenverträge, Produktlebenszyklus, Bestellverhalten, usw.) existieren ggf. viele variierende Instanzen eines Musters. Dennoch sind die zu einem beliebigen Zeitpunkt vorliegenden Daten stets als Stichprobe²³ zu sehen. Daraus geht die Anforderung einer in Bezug auf die tatsächliche Streuung zweckmäßigen Abbildung hervor, sodass auch das Eintreten gleichartiger aber bisher unbeobachteter Bestellverläufe berücksichtigt wird.

2.3.2 Abbildung der Bedarfsunsicherheit bei begrenzter Bedarfsanmeldung

Zu jedem Planungszeitpunkt sind produktionsbezogene Entscheidungen zu treffen, welche von der Entwicklung angemeldeter, aber noch unsicherer Bestellungen abhängen. Da deren Fortschreibung nur zum Teil unter Verwendung ggf. vorhandener Muster möglich und prinzipiell fehlerbehaftet ist, bliebe eine Dynamik mit gleichartigen Folgen zu jenen aus Abschnitt 2.2.3 erhalten. Somit ergibt sich die Anforderung prädiktive Maßnahmen nicht auf eine pauschale Punktprognose zu beschränken. Stattdessen sind alternative Ausprägungen der unbekanntem Zukunft in Form von Szenarien systematisch herzuleiten wie auch zu gewichten, sodass die aktuelle Bedarfsunsicherheit möglichst exakt abgebildet wird und die Auswirkungen potenzieller Bedarfssituationen zielführend im Steuerungsprozess gegeneinander abgewogen werden können (vgl. Abschnitt 2.3.3). Es ist anzumerken, dass ein Gewicht unter Auswertung aller verfügbaren Informationen als Ausmaß an Zuversicht bezüglich der betreffenden Alternative relativ zu allen Anderen anzusehen ist. Der Wert entspricht also nicht der Eintrittswahrscheinlichkeit, welche aufgrund des geringen Stichprobenumfangs und der dynamischen Umgebung generell unbekannt ist²⁴. Die zur Beschreibung der Bedarfsunsicherheit vorhandenen Größen und deren Zusammenhang stellt Abbildung 10 anschaulich dar.

²³ Die Stichprobe bezeichnet „eine zufällige Teilmenge aus einer Menge von beliebigen Objekten [...], die sich durch ein oder mehrere gemeinsame Merkmale auszeichnen“ [PBK05, S.5].

²⁴ Soll dennoch auf eine explizite Unterscheidung der Relevanz einzelner Fälle verzichtet werden, ist die Gleichgewichtung ($1/|S|$) anzunehmen.

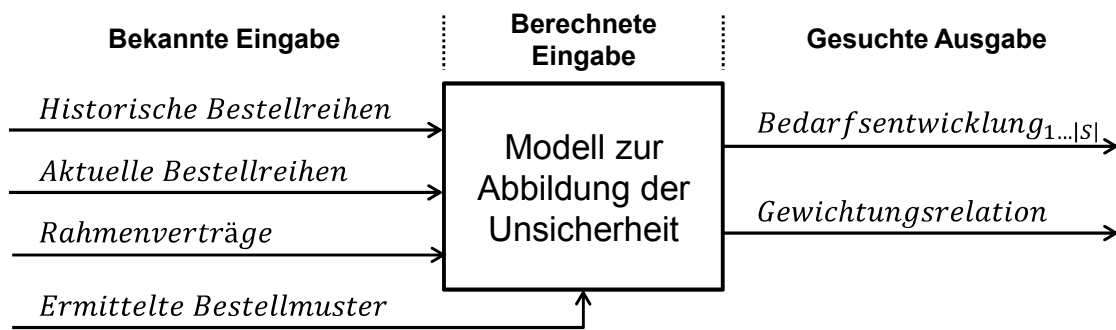


Abbildung 10: Ein-/ Ausgabe des Modells zur Abbildung der Bedarfsunsicherheit

Das Ausmaß der Bedarfsunsicherheit folgt zu einem beliebigen Zeitpunkt aus der Verknüpfung bewerteter Einzelunsicherheiten aller im Planungshorizont vorhandenen Bestellungen. Als grundlegende Anforderung ist daher die Herleitung der jeweiligen Bestellunsicherheit auf Kunden- und Erzeugnisebene zu sehen. Die Bewertung hat situationsbedingt auf Basis der in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten Anforderungen zu erfolgen, d. h. jede Bestellhistorie ist auf typisches Verhalten zu prüfen und falls vorhanden mit der durch das Muster gegebenen Restunsicherheit bzgl. Menge und Termin fortzuschreiben. In diesem Zusammenhang ist unter anderem zu definieren wie Bestellverläufe mit Mustern verglichen werden, bis zu welchem Grad die Zuordnung erfolgt, nach welchen Kriterien bezüglich bedarfs-/verbrauchsorientierter Vorhersage unterschieden wird und wie mit mehreren unterschiedlichen Mustern pro Bestellung umzugehen ist. Für den Fall das eine musterbasierte Fortschreibung nicht möglich ist, muss eine alternative Abschätzung der Unsicherheit erfolgen, welche ebenfalls die bisher gesammelten Bestellinformationen nutzt.

Bei ermittelten Bestellunsicherheiten umfasst die Aufgabe der Generierung des Szenariosets die Kombination einzelner fortgeschriebener Bestellalternativen zu Szenarien, sodass jede im Planungshorizont vorkommende (noch unsichere) Bestellung eines Kunden mit genau einer möglichen Ausprägung enthalten ist. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass Bestellalternativen unterschiedlicher Kunden für denselben Tag und das gleiche Erzeugnis als unabhängige Ereignisse betrachtet werden. Ein Szenario muss als mögliche Ausprägung der unbekanntes Zukunft je Periode p und Erzeugnis e genau eine Bedarfsmenge BM definieren. Die Anzahl der zu ermittelnden Bedarfsentwicklungen ist als Parameter zu berücksichtigen²⁵. Das Szenarioset S be-

²⁵ Die Anzahl kann als maximal handhabbare Szenariomenge betrachtet werden, für die das Optimierungsproblem bei gegebenen Ressourcen gerade noch in ausreichend kurzer Zeit zu lösen ist.

schreibt die Gesamtheit aller ermittelten Szenarien und lässt sich als Menge mit der durch Formel (2.14) definierten Elementstruktur darstellen.

$$\left((BM_{0,0}^0, \dots, BM_{|E|-1,|P|-1}^0), \dots, (BM_{0,0}^{|S|-1}, \dots, BM_{|E|-1,|P|-1}^{|S|-1}) \right) \quad (2.14)$$

Die ermittelte Unsicherheit einer Bestellung hinsichtlich Termin und Menge legt die Relevanz der einzelnen Alternativen in Form von Gewichten fest²⁶. Mögliche Extrema ergeben sich durch eine exklusive Ausprägung (keine Unsicherheit) bzw. durch gleichverteilte Möglichkeiten innerhalb der maximalen Mengen- und Terminveränderung (höchste Unsicherheit). Aus komplexitätstechnischen Gründen kann allerdings lediglich eine relativ geringe Anzahl an potenziellen Bedarfsentwicklungen betrachtet werden, sodass die vollständige Kombination aller Bestellalternativen zu Szenarien (inkl. entsprechender Gewichtung) nicht zur Abbildung der Bedarfsunsicherheit zu nutzen ist²⁷. Hieraus ergibt sich die Anforderung den Kombinationsprozess an den Bestellunsicherheiten auszurichten, um die vermutete Bedarfsunsicherheit trotz Selektion möglichst korrekt abzubilden und zusätzliche Kosten durch fehlgeleitete Steuerungsentscheidungen (vgl. Abschnitt 2.3.3) zu vermeiden. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass mit zunehmender Ähnlichkeit von Szenarien der jeweilige Mehrwert im Sinne der gewinnmaximierenden Steuerung tendenziell abnimmt. Daher ist ein geeignetes Spektrum potenzieller Bedarfsentwicklungen auf Basis eines heuristischen Vorgehens abzudecken und die Einhaltung der ermittelten Bedarfsunsicherheit durch Anpassung der Gewichtsrelation sicherzustellen.

Eine Bestellung befindet sich im Allgemeinen für mehrere Steuerungszyklen im Bereich des (unsicheren) Planungshorizonts. Daraus ergibt sich die Anforderung die Methodik zur Analyse und Beschreibung der Bedarfsunsicherheit so zu konzipieren, dass der kundenseitige Prognosefehler möglichst frühzeitig und mit geringer Unsicherheit zu korrigieren ist, sodass eine Verlängerung der Reaktionszeit erreicht wird. Insbesondere ist hier auch ein ggf. zeitabhängiges Ausmaß der Bestellunsicherheit zu berücksichtigen.

²⁶ Die Argumentation zur Bedeutung eines Gewichts ist hier analog zum Kontext von Fußnote 24.

²⁷ Beispiel: Bei einem Planungshorizont mit 10 Perioden, wobei in jeder Periode dieselben 5 Erzeugnisse nachgefragt werden und deren Wertebereich auf 3 Alternativen begrenzt ist ergeben sich bereits $3^{5 \cdot 10} \approx 7,18 \cdot 10^{23}$ mögliche Szenarien.

2.3.3 Steuerung der Entscheidungsgrößen bei gegebener Bedarfsunsicherheit

Zur gewinnmaximierenden Steuerung ist zunächst ein Entscheidungsmodell zu entwickeln, welches den planenden Anteil der Problemstellung geeignet abbildet. Auf dieser Basis sind in jedem Planungszyklus die als nächstes umzusetzenden Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen mit höchstmöglicher Genauigkeit und unter Kenntnis der erreichten Lösungsgüte zu bestimmen bzw. zu steuern. Aus diesem Grund ist ein gemischt ganzzahliges Optimierungsmodell zu konzipieren, an welches die folgenden inhaltlichen Anforderungen gestellt werden:

- Simultane Betrachtung der Entscheidungsgrößen für den Planungshorizont
- Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften gegebener Elementarfaktoren
- Zielfunktion auf Basis des Gewinns durch Abbildung des Zielsystems
- Gewinnmaximierung durch explizite Integration der Bedarfsunsicherheit

Während die ersten drei Erfordernisse direkt aus dem in Abschnitt 2.1 definierten Betrachtungsgegenstand folgen, wird die Notwendigkeit der Integration von Bedarfsunsicherheit durch die Ausführungen in Abschnitt 2.2 lediglich motiviert und soll nachfolgend hinsichtlich den Anforderungen an die Integration detailliert werden.

Die Gewinnmaximierung kann mittelfristig nur erreicht werden, wenn die Bedarfsunsicherheit explizit bei der Entscheidungsfindung je Planungszyklus betrachtet wird und damit zu einer erhöhten Ergebnisrobustheit führt. „Die Grundidee der robusten Planung besteht darin, einen prädiktiven Plan unter Einbeziehung möglicher Unsicherheitsfaktoren zu erstellen. Durch dieses Vorgehen sollen schon während des Planungsprozesses mögliche Störereignisse antizipiert werden, sodass sie keine oder nur geringe Auswirkungen auf dessen Effektivitätskennzahlen [...] haben“ [Neu08, S.39]. Die Steigerung der Ergebnisrobustheit gegenüber kundenseitiger Dynamik resultiert jedoch in zusätzlichen Kosten, da durch vorzeitige und bedarfsübersteigende Produktionsmaßnahmen das Ziel verfolgt wird, zunehmend größere Nachfrage kurzfristig bedienen zu können. Daraus resultieren erhöhte Lagermengen-/dauern und ein ggf. ungünstiger Elementarfaktoreinsatz, da eine beliebige Vorproduktion nicht möglich oder teurer als alternative Maßnahmen ist. So kann es bspw. zu häufigeren Rüstvorgängen, der Verwendung weniger gut geeigneter Maschinen oder zum vermehrten Einsatz teurer (auch nicht ausgelasteter) Schichtkombinationen kommen. Vor dem Hintergrund der Gewinnmaximierung wird klar, dass Robustheit nicht zwangsläufig im Sinne des Zielsystems ist, sondern dessen Ausmaß vom Grad der Bedarfsunsicherheit zum Planungszeitpunkt abhängt²⁸. Gegen-

²⁸ Eine grafische Veranschaulichung des Zusammenhangs liefert z. B. [VV02, S.774].

über den vermuteten Bedarfsanpassungen kann häufig ein Plan mit deutlich erhöhter Ergebnisrobustheit bei geringen Zusatzkosten erzielt werden. In jedem Zyklus ist dazu auf Grundlage des Szenariosets der erwartete Gewinn im Planungshorizont zu optimieren, d. h. alle Entscheidungen sind bezüglich der resultierenden Güte bei gegebenen alternativen Szenarien abzuwiegen. Das Risiko signifikanter Fehlentscheidungen in Form von vorzeitigen oder aufgeschobenen produktionsbezogenen Maßnahmen wegen fehlerhafter Prognosen wird hierbei reduziert, da die Entscheidung zur Antizipation der Bedarfsunsicherheit zum Planungsgegenstand wird. Der resultierende Plan ist damit für die gegebenen unsicheren Bedarfsentwicklungen optimal. Zu berücksichtigende Aspekte bei diesem Vorgehen sind im Detail:

- **Unterscheidung fixierter/geplanter Größen:** Die Modellierung der Produktionsentscheidungen unter Unsicherheit hat die Differenzierung nach fixierten, zu realisierenden sowie geplanten, szenarioabhängigen Größen hinsichtlich Erlös und Kosten vorzusehen. Im Rahmen der Steuerung ist zu berücksichtigen, dass unsichere Bestellungen in den Bereich irreversibler Entscheidungen nur dann eingehen, wenn sich dies positiv auf den erwarteten Gewinn (d. h. über alle geplanten Szenarien) auswirkt.
- **Bedarfssituation im Planungshorizont:** Die Abbildung unsicherer Bedarfe erfolgt durch das Szenarioset. Vorzeitige produktionsbezogene Maßnahmen sind diesbezüglich eher bei geringem/ansteigendem als bei hohem/fallendem Bedarfsverlauf durchzuführen um teurere Schichtkombinationen effizient einzusetzen. Dabei ist deren kostenmäßige Abhängigkeit vom Kalendertag zu beachten.
- **Szenarioabhängige Gewichtungsfaktoren:** Diese sind so zu integrieren, dass die Entscheidungsgrößen gemäß den gegebenen Faktoren von den Bedarfsalternativen determiniert werden. Infolgedessen findet beispielsweise die Vorproduktion für Bedarfe aus hoch gewichteten Szenarien bevorzugt statt.
- **Verhältnisse monetärer Größen des Zielsystems:** Die anwendungsfallspezifischen Relationen (insb. Lagerkosten zu Verzugs-/Schichtkosten) definieren einen erheblichen Teil der monetären Potenziale verhinderter Über-/ Unterproduktion im Zuge unsicherer Bedarfe und sind damit bei der Steuerung aller Entscheidungsgrößen zu berücksichtigen.
- **Zustände und Limitierungen der Elementarfaktoren:** Die Zweckmäßigkeit der bedarfsübersteigenden Produktion ist je Planungszyklus situationsabhängig, d. h. gemäß aktueller Bestände, verbleibender Lagerkapazitäten und den Rüst-/Wartungszuständen der heterogenen Maschinen, im Hinblick auf die unsicheren Bedarfe des Horizonts zu bewerten.

Insbesondere durch die explizite Berücksichtigung der Bedarfsunsicherheit, aber auch durch die simultane Betrachtung aller Teilplanungsaufgaben über einen ausreichend dimensionierten Planungshorizont, entsteht ein sehr komplexes Entscheidungsproblem, welches im verfügbaren Zeitrahmen kaum optimal gelöst werden kann²⁹. Um dieser Problematik entgegenzuwirken sind sowohl geeignete Maßnahmen zur Reduktion der Modellkomplexität als auch zur Sicherstellung der effizienten Berechnung aller Entscheidungsgrößen zu entwickeln. Die komplexitätsreduzierenden Maßnahmen sind an dem Ziel der geringstmöglichen Auswirkung auf die Güte umgesetzter Entscheidungen auszurichten. Im Kontext des Vorgehensmodells zur Steuerung (Abschnitt 2.1.5) soll dies durch eine abnehmende Detaillierung des Betrachtungsgegenstandes in dem Bereich des Planungshorizonts erreicht werden, deren zugehörigen Entscheidungen lediglich vorläufigen Charakter aufweisen. Die effizienzsteigernde Berechnung ist durch ein nachgelagertes Verfahren zu erzielen, welches unter Verwendung des entwickelten Modells sowie problemspezifischem Wissen vereinfachte Teilprobleme löst und damit sukzessiv eine gültige Belegung aller gesuchten Entscheidungsvariablen ermittelt. Die Motivation folgt hierbei aus dem im Allgemeinen exponentiellen Rechenaufwand in Abhängigkeit der Problemgröße (vgl. [SM06b, S.9f]). Insgesamt soll durch Umsetzung beider Anforderungen die Betrachtung realistischerer Modellinstanzen erreicht werden.

²⁹ Nach [Tem05, S.163–165] ist bereits im Fall des Optimierungsmodells für das CLSP die Berechnung einer optimalen Lösung nicht ohne Weiteres möglich. Das in dieser Arbeit definierte Problem übersteigt den genannten Betrachtungsgegenstand deutlich.

3 Stand der Technik

Nachdem im vorangegangenen Kapitel das Problem detailliert erläutert und die zur Lösung notwendigen Anforderungen abgeleitet wurden, sollen nachfolgend Arbeiten vorgestellt werden, welche sich mit diesen Aspekten zur gewinnmaximierenden Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätssteuerung unter Bedarfsunsicherheit auseinandersetzen. Die in den Arbeiten beschriebenen Verfahren werden hierzu in die drei Bereiche der Mustererkennung im Kontext von Zeitreihen, der Abbildung von Bedarfsunsicherheit und der gewinnmaximierenden Steuerung bei gegebener Bedarfsunsicherheit gegliedert. Veröffentlichungen die Anforderungen aus verschiedenen Bereichen berücksichtigen, werden daher mehrfach aufgegriffen.

3.1 Mustererkennung im Kontext von Zeitreihen

Zur musterbasierten Analyse der Bestellinformationen ist zunächst die Datengrundlage zu spezifizieren. Eine Menge von Beobachtungswerten eines Merkmals die einer zeitlichen Ordnung unterliegen, wird als Zeitreihe bezeichnet [SS01, S.1]. Die zeitliche Abfolge der Bestellinformationen auf Kunden-/ Erzeugnisebene entspricht dem beobachteten Merkmal, sodass sich das genannte Konzept zur formalen Modellierung anbietet. Für eine Zeitreihe ZR der Länge N gilt:

$$ZR = \{e_1, e_2, \dots, e_N\} \quad (3.1)$$

Der zeitliche Abstand ZA zwischen benachbarten Elementen i, j einer äquidistanten Zeitreihe beträgt immer c Zeiteinheiten. Vor dem Hintergrund das Bestellinformationen genau einmal pro Tag eintreffen, gilt:

$$\forall i, j \in ZR: ZA(i, j) = c = 1 \quad (3.2)$$

Nachfolgend wird in Abschnitt 3.1.1 die Aufbereitung der Zeitreihendaten betrachtet, was als vorbereitender Schritt im Hinblick auf eine zielführende Mustererkennung zu interpretieren ist. Die Verwendung des Musterbegriffs ist in der Literatur nicht eindeutig, wird aber im Kontext von Zeitreihen im Wesentlichen als spezifizierte Teilkomponente oder als wiederholt auftretende, beliebige Teilzeitreihe verstanden. Daher wird in den Abschnitten 3.1.2 und 3.1.3 auf die jeweiligen Methoden der unterschiedlichen Betrachtung von Mustern im Zusammenhang mit Bestellzeitreihen eingegangen.

3.1.1 Datenaufbereitung

Das Ziel der Mustererkennung ist die Bereitstellung zusätzlicher Informationen, um die Vorhersage der nächsten tatsächlichen Kundenbedarfe bei minimalem Prognosefehler durchzuführen. Zur Zielerreichung sind möglichst vollständige und ausreißerfreie Zeitreihen als Datengrundlage einzusetzen. Für den Fall das die Primärdaten die beiden genannten Eigenschaften erfüllen, liefern sie die genaueste Beschreibung des kundenseitigen Bestellverhaltens. In realen Anwendungen kann aufgrund von Fehlern bei der Datenerfassung³⁰, -Übertragung³¹, -Speicherung³² und Nachbearbeitung³³ jedoch nicht von der Richtigkeit der Primärdaten ausgegangen werden (vgl. [Arm01, S.222–223]).

Durch kontextspezifisches Wissen, welches häufig in Praxisproblemen vorhanden ist, wird das Auffinden der genannten Fehler vereinfacht [Cro08, S.148]. Ein Planer des produzierenden Unternehmens kennt beispielsweise im Fall der langfristigen Kundenbeziehungen durch das Konzept der Rahmenverträge häufig die „üblichen“ Bestellmengen und -intervalle der Kunden. Zumindest bei gravierenden Abweichungen sind diese daher relativ leicht zu identifizieren und (ggf. durch Nachfrage beim Kunden) zu korrigieren. Um den Identifikationsprozess zu vereinfachen können grafische Aufbereitungen in Form von Boxplots und Streudiagrammen eingesetzt werden (vgl. [Leh05, S.160]). Lassen sich darüber hinaus Auswirkungen historischer Sonderereignisse quantifizieren, so sind die betroffenen Zeitreihenwerte ebenfalls leicht zu bereinigen. Im Fall von Fehlwerten als Folge eines sporadischen Bedarfs ist der Problematik notfalls durch Aggregation der Zeitreihen auf Kunden-/ oder Erzeugnisebene zu entgegnen, was allerdings mit einem Informationsverlust einhergeht.

Darüber hinaus existieren numerische Verfahren, welche im Allgemeinen zunächst ein (ggf. einfaches) Prognosemodell ermitteln und nachgelagert anhand von Kennzahlen³⁴ die Differenz zwischen Vorhersagewert sowie bereits bekanntem Zeitreihenwert laufend analysieren. Bei Überschreitung eines Grenzwerts³⁵ wird ein Ausreißer detektiert, welcher durch den Prognosewert oder einen (ggf. lokalen) Mittelwert ersetzt werden kann. Spezifische Anwendungsfälle dieser automatischen Aufbereitung finden sich z. B. in

³⁰ Beispielsweise Tippfehler des Planers oder Fehler bei der Auswahl der Mengeneinheit.

³¹ Beispielsweise durch unvollständige oder mehrfache Übertragung, soweit dies nicht durch anwendungsspezifische Protokolle überwacht bzw. korrigiert wird.

³² Beispielsweise Hardwarefehler.

³³ Beispielsweise infolge einer Datenkonsolidierung.

³⁴ Beispielsweise der mittlere absolute Fehler (MAF). Bei gegebenen Prognosewerten y_t^* und Zeitreihenwerten y_t gilt: $MAF = \sum_{t=1}^T |y_t^* - y_t|$. Details vgl. [MHW98, S.41ff].

³⁵ Bei Verwendung des MAF nach [Tem05] bei etwa der vier bis fünffachen Abweichung zwischen aktuellem MAF- und Prognosewert.

[Lew82, S.55–62], [Las05, S.84–85] sowie [Fox97, S.268–281]. Es ist anzumerken, dass die numerische Korrektur nicht vollautomatisiert ablaufen sollte, sondern potenzielle Ausreißer zu ermitteln hat, über die nachgelagert manuell entschieden werden muss (vgl. [Tem05, S.97]).

Die Verarbeitung der Bestellinformationen erfolgt zunehmend unter Verwendung technischer Systeme, welche durch zahlreiche Maßnahmen (Eingabehilfen, Prüfprotokolle, transaktionsbasierte Abläufe und ähnlichem) das Ausmaß fehlerhafter Primärdaten reduzieren, sodass in Kombinationen mit den vorgestellten Möglichkeiten von einer ausreichend hohen Genauigkeit der Datenbasis zur weiteren Analyse ausgegangen wird.

3.1.2 Klassische Zeitreihenanalyse

Die Motivation für die Modellierung von Zeitreihen liegt häufig darin begründet, eine formale Grundlage zu schaffen, auf deren Basis die Analyse des zeitlichen Ablaufs durchgeführt werden kann. Um entsprechende Gesetzmäßigkeiten möglichst genau zu identifizieren, wurde das Zeitreihenkomponentenmodell entwickelt. Es verfolgt das Ziel „die einzelnen Komponenten der Zeitreihe zu isolieren, deren Regelmäßigkeiten zu erkennen und getrennt von den anderen Komponenten zu quantifizieren (prognostizieren)“ [Les04, S.55]. In diesem Kontext werden die folgenden vier Elemente ökonomischer Zeitreihen unterschieden (vgl. beispielsweise [Tem05, S.37–39]):

- **Trendkomponente *T***: Bildet die langfristige Grundrichtung, d. h. das mittlere Niveau im Zeitverlauf ab
- **Konjunkturkomponente *K***: Repräsentiert gesamtwirtschaftliche, häufig unregelmäßig wiederkehrende, überjährige Schwankungen
- **Saisonkomponente *S***: Bildet die periodisch auftretenden und häufig branchenabhängigen Schwankungen ab
- **Irreguläre Komponente *I***: Fasst die nicht zu erklärenden Schwankungen zusammen (wird daher auch als Restkomponente oder stochastische Komponente bezeichnet)

Die Zeitreihe ZR ergibt sich durch die additive oder multiplikative Verknüpfung der vier Komponenten. Der multiplikative Ansatz modelliert, dass sich mit steigendem Trend auch das Ausmaß der Saison sowie die Streuung um den Trend vergrößern³⁶. Für eine grafische Darstellung des Zusammenhangs der Komponenten sei an [Lew74, S.19] verwiesen. Allgemein gilt:

³⁶ Die multiplikative Verknüpfung kann durch Logarithmieren auf ein additives Modell zurückgeführt werden (vgl. [Sti11, S.67]).

$$ZR_t = T_t \oplus K_t \oplus S_t \oplus I_t \quad (3.3)$$

Zur Dekomposition der Zeitreihe in ihre Elemente steht eine Vielzahl von Verfahren unterschiedlicher Komplexität bereit. Dies umfasst Methoden wie die sukzessive Bestimmung der Bestandteile durch Anwendung (ggf. gewichteter) gleitender Durchschnitte (vgl. [MHW98, S.135–178]), die (ggf. lokale) Regressionsrechnung zur Minimierung der Abweichungsquadrate einer Funktionen beliebigen Grades (vgl. [MHW98, S.185–227]), bis hin zu speziellen Saisonbereinigungsverfahren wie X-12 ARIMA, welches vom statistischen Bundesamt seit 2001 eingesetzt wird oder der STL-Methode (vgl. [MHW98, S.113–126]). Ist insbesondere die Saisonkomponente von Bedeutung (da z. B. mehrere überlagerte Saisons existieren deren Perioden unbekannt sind) eignet sich gegebenenfalls auch die Harmonische Analyse bzw. Fourieranalyse (vgl. [Sti01, S.179–194]).

Aufgrund der Anschaulichkeit und Nachvollziehbarkeit hat das vorgestellte Komponentenmodell große Verbreitung in der Literatur gefunden. Das Einsatzgebiet ist dennoch zumeist lediglich erklärender Natur im Sinne einer ex post Analyse, weniger die Prognose zukünftiger Werte. Bei Befragungen unterschiedlicher Industriezweige auf Konferenzen des Institute of Business Forecasting in 2001 und 2002 gaben lediglich 5 % der befragten Prognostiker an die Dekomposition einzusetzen (vgl. [Cro08, S.90–91]). Begründen lässt sich dies u. a. damit, dass die in der Praxis auftretenden Zusammenhänge in Zeitreihen nicht zeitinvariant sind und daher eine exakte Modellbildung sehr komplex bis unmöglich machen. Mithilfe ausreichend großer Polynomgrade können grundsätzlich beliebig komplexe Zeitreihen beschrieben werden, dies erlaubt jedoch nicht den Schluss auf deren Zweckmäßigkeit. „Eine Vergleichsanalyse zwischen diesen verschiedenen polynomialen Modellen zeigt, dass die Genauigkeit dieser Prognosesysteme nicht vom Komplexitätsgrad abhängt (Grad des Prognosepolynoms), sondern von ihrer dynamischen Qualität“ [Lew74, S.48]. Prognoseverfahren versuchen daher im Allgemeinen nicht eine vorliegende Zeitreihe in ihre grundsätzlichen Bestandteile zu zerlegen, sondern zielen auf die ganzheitliche Vorhersage der wechselwirkenden Komponenten auf Basis einer bestimmten Anzahl von (gegebenenfalls gewichteten) Beobachtungswerten (dem Stützbereich) ab. Damit rückt allerdings die geforderte, explizite Analyse von Mustern in den Hintergrund, weshalb an dieser Stelle lediglich zur Abgrenzung wesentliche Verfahren des Bereichs in Tabelle 4 genannt werden.

Bezüglich erörterter Zeitreihenkomponenten ist festzustellen, dass diese zwar auch als Muster bezeichnet werden können, jedoch eher der Beschreibung langfristig bestehender Zusammenhänge dienen und den Anforderungen zur Abbildung kurzfristiger Bedarfsdynamik nicht genügen.

Naive Methoden	Mittelwerte	Regressions-Verfahren	AR-MA Verfahren	Erweiterte AR-Prozesse
Same Value	Gleitende Mittelwerte	Einfache Regression	ARMA	TAR Modelle
	Gewichtete Mittelwerte			
Random Walk	Nach Brown	Lokalisierte Regression	ARIMA	ARCH Modelle
	Dampened Trend nach Gardner			
Same Trend	Adaptive Response Rate	Nicht lineare Regression	SARIMA	GARCH Modelle
	Sporadisch nach Wedekind			
Same Season	Doppelt nach Brown			
	Saisonal nach Holt-Winters			

Tabelle 4: Modelle der Zeitreihenprognose (vgl. [Cro08, S.90], [Bre02, S.15–17])

Neben genannten Grundkomponenten existieren gegebenenfalls auch systematische und mehrperiodische Einzeleinflüsse wie z. B. Absatzspitzen durch Werbemaßnahmen sowie Nachfrageverschiebungen infolge von Preisänderungen. Sind die Konsequenzen nicht direkt bekannt jedoch deren Ursachen, so kann das Komponentenmodell um eine Marketingkomponente erweitert werden, welche die temporären Abweichungen abbildet, um die Verzerrung anderer Komponenten zu mildern (vgl. [Lew74, S.18–19]). Diese nachträgliche Bereinigung ist jedoch häufig nur noch bedingt möglich, da die zugrunde liegenden Ursachen bezüglich der Höhe des Bedarfs nicht oder nur unzureichend nachgehalten werden (vgl. [Tem05, S.97]).

Steht die Betrachtung kausaler Einflüsse im Vordergrund, findet sich ein weiterer relevanter Beitrag in [Les04]. Der Autor entwickelt ein Prognosemodell, welches durch die Modellierung zahlreicher Einflussfaktoren die saisonalen und kalendarischen Abhängigkeiten des deutschen Kalenders berücksichtigt. Die einzelnen Komponenten werden mit Hilfe von Dummy Variablen modelliert, deren Koeffizienten durch Schätzung der Regressionsfunktion bestimmt und damit aus der Zeitreihe extrahiert. Anwendungsfall ist die Kapazitätsplanung bei Bedarfsunsicherheit im Rahmen typisierter Dienstleistun-

gen (Express-, Paket- und Briefdienste). Es ist hervorzuheben, dass die Potenziale genannter Kausaleinflüsse nur erschlossen werden können, wenn deren periodenbezogenen Ursachen sowohl historisch als auch zukünftig bekannt sind. Anhand der in Abschnitt 2.2.1 diskutierten Gründe kundenseitiger Bedarfsdynamik wird deutlich, dass diese Annahme in vorliegender Arbeit nicht grundsätzlich zu treffen ist.

Soll die Dynamik des Zeitreihenverlaufs weiter in den Vordergrund treten, so sind weniger die (möglicherweise) vorhandenen Grundkomponenten einer Zeitreihe oder deren letzten n Werte, sondern die zu unterschiedlichen Zeitpunkten wiederkehrenden Teilverläufe von Bedeutung. In [Bre02] wird daher zunächst vom konkreten Anwendungsfall der Zeitreihe abstrahiert und die Komponenten T_t und K_t zur glatten bzw. Polynomkomponente P_t zusammengefasst. Im Anschluss wird das Komponentenmodell um einen Musteranteil M_t erweitert, welcher typische, lineare und nichtlineare, zu unterschiedlichen Zeitpunkten ggf. unregelmäßig wiederkehrende Teilverläufe allgemein beschreibt. Gleichung (3.3) verändert sich daher zu:

$$ZR_t = P_t \oplus S_t \oplus M_t \oplus I_t \quad (3.4)$$

Damit ist explizit dem dynamischen Aspekt und folglich einem Kritikpunkt des klassischen Komponentenmodells (insb. im Bereich der kurzfristigen Prognose) Rechnung getragen. Darüber hinaus wird nach Bretschneider die Modellbildung vereinfacht, falls nichtlineare Zusammenhänge durch die Musterkomponente abgebildet werden und zu einer Linearisierung des Zeitabschnitts führen. Um die genannten Potenziale zu realisieren, sind allerdings die unbekanntes Muster geeignet aus der Zeitreihe zu extrahieren.

3.1.3 Zeitreihenclustering

Bei der musterbasierten Analyse der Bestellhistorie geht es um eine Aufteilung der auf Kunden-/Erzeugnisebene vorliegenden Zeitreihen in mehrere Gruppen von (Teil-) Zeitreihen, welche in ähnlicher Form vielfach in der Datenbasis enthalten sind und damit die Regelmäßigkeiten des Bestellverhaltens repräsentieren. Die Ähnlichkeit bezieht sich im Fall von verbrauchsorientierten Mustern ausschließlich auf die Mengen- und bei bedarfsorientierten Mustern zusätzlich auf eine Termindimension. Da die gesuchten Muster im Wesentlichen unbekannt sind, wird dieses Problem in der Literatur als unüberwachtes Lernen bezeichnet und methodisch der Clusteranalyse zugeordnet (vgl. [JD88, S.56–57]). Das allgemeine Ziel der Clusteranalyse ist es die vorhandenen Objekte aufgrund von Beobachtungen in verschiedene Klassen einzuteilen, sodass die folgenden Anforderungen erfüllt sind (vgl. [Bac06, S.479ff]):

- **Homogenität innerhalb der Cluster:** Die Elemente eines Clusters sind möglichst ähnlich zueinander
- **Heterogenität zwischen den Clustern:** Die Elemente aus verschiedenen Clustern unterscheiden sich möglichst stark

Zur Bewertung der Ähnlichkeit von Elementen ist in Abhängigkeit der Datengrundlage ein geeignetes Distanzmaß zu wählen. Im vorliegenden Fall der kardinal skalierten Merkmale sind als bekannteste metrische Maße die (quadrierte) euklidische, die Manhattan und die Minkowski Distanz zu nennen³⁷. Auf dieser Basis kann die Einteilung der Elemente in Cluster vorgenommen werden, wobei zwei grundsätzliche Prinzipien voneinander zu unterscheiden sind, welche nachfolgend in Anlehnung an [HN10, S.373–426] und [JD88, S.55–132] erläutert werden.

Die Gruppe der hierarchischen Verfahren führen eine Sequenz von Einteilungsschritten durch. Dabei wird ausgehend von der ursprünglichen Menge an Elementen eine ineinander verschachtelte, hierarchische Struktur von Clustern erzeugt. Diese wird meist in Form einer Baumstruktur dargestellt und als Dendogramm bezeichnet. Die agglomerativen Varianten betrachten zunächst jedes Element als Cluster und aggregieren diese sukzessive zu größeren Clustern. Divisive Verfahren verfolgen die entgegengesetzte Funktionsweise, d. h. ausgehend von einem Cluster der alle Elemente erhält, werden schrittweise kleinere Cluster bestimmt. Bei gegebener Distanzfunktion können unter anderem das Single Linkage-, Complete Linkage- oder Ward-Verfahren zur Berechnung der Clusterentfernungen verwendet werden. Als Vorteil wird die Interpretationsfähigkeit des Dendogramms genannt, wohingegen die Irreversibilität der Einteilungsschritte als wesentlicher Nachteil gilt. Partitionierende Verfahren verzichten auf die Erzeugung einer hierarchischen Struktur und teilen die Menge der Elemente in eine gegebene Anzahl von Clustern auf. Ausgehend von einer beliebigen initialen Elementzuordnung wird mehrfach eine Umverteilung vorgenommen. Dazu ist in einer Iteration je Cluster das Zentrum zu bestimmen und jedes Element dem ähnlichsten Cluster zuzuordnen. Das Verfahren endet, wenn durch Neuzuweisung keine größere Homogenität erreichbar ist. Beispielhafte Methoden sind K-means, EM (Expectation Maximization) oder Self Organizing Maps. Neben den positiven Aspekten der Einfachheit und kurzen Laufzeit wird die Auswirkung der Wahl initialer Clusterzentren sowie der Vorgabe der Clusteranzahl kritisch angemerkt. Letzteres gilt insbesondere im Kontext der Problemdefinition, da ein Cluster als potenzielles Muster betrachtet werden kann und deren Anzahl damit a priori unbekannt ist.

³⁷ Für eine umfassendere und formalisierte Darstellung von Distanzmaßen im Zusammenhang mit Zeitreihen sei an [Lia05, S.1861–1863] verwiesen.

Während im Fall der bedarfsorientierten Muster von einer Zeitreihe je Bestellung ausgegangen werden kann, liegt für die Ermittlung der verbrauchsorientierten Muster lediglich jeweils eine Zeitreihe als Resultat der fixierten Bestellmengen vor, sodass die Muster zwangsläufig in Form von Teilzeitreihen zu bestimmen sind. In [KL05, S.154] kamen die Autoren zu folgender Erkenntnis: "Clustering of time-series subsequences is meaningless". Der Begriff „bedeutungslos“ (engl. meaningless) wird bezüglich eines Verfahrens so definiert, dass die Ausgabe unabhängig von der Eingabe ist (vgl. [KL05, S.155]). Als wesentliches Problem beim Clustern von Teilzeitreihen wird die Generierung der Datenbasis angesehen. Sei ZR die zu analysierende Zeitreihe, dann wird die Menge der Teilzeitreihen TZR_{ZR}^M einer beliebigen Länge l durch fortlaufendes Inkrementieren des Index gewonnen, an dem die jeweilige Teilzeitreihe beginnt³⁸. Damit gilt:

$$TZR_{ZR}^M = \{(e_1, e_2, \dots, e_l), (e_2, e_3, \dots, e_{l+1}), \dots, (e_{|T|-l}, e_{|T|-l+1}, \dots, e_{|T|})\}, \quad (3.5)$$

Unabhängig von dem eingesetzten Clusterverfahren begründen die Autoren das Scheitern der Methoden durch die folgenden beiden Aspekte³⁹:

1. **Eine versteckte Bedingung:** Für eine beliebige Datenbasis gilt, dass der durch die Clustergröße gewichtete Mittelwert der k Cluster dem globalen Mittelwert entspricht. In [TK03] wird gezeigt, dass der globale Mittelwert der auf TZR_{ZR}^M angewendeten Clusterverfahren eine nahezu konstant verlaufende Teilzeitreihe ergibt. Nach zuvor genannter Bedingung ist damit gefordert, dass der gewichtete Mittelwert der k Cluster aus TZR_{ZR}^M in Summe ebenfalls konstanten Charakter aufweist, was jedoch nicht allgemein vorausgesetzt werden kann.
2. **Triviale Treffer:** Teilzeitreihen weisen in Abhängigkeit ihres Verlaufs eine gegebenenfalls signifikant unterschiedliche Anzahl an gleichartigen Teilzeitreihen in deren Umgebung auf. Relativ gleichmäßige, sich im Verlauf nur langsam ändernde Reihen führen tendenziell zu vielen trivialen Treffern, während im Verlauf stark schwankende eher wenige solcher Treffer aufweisen. Dies hat eine verfälschte Wahl von Clusterzentren zur Folge.

Das Auffinden unbekannter Motifs in Zeitreihen wird erstmals in [Lin et al.02] beschrieben. Der Grundgedanke der vorgestellten Methode ist die Identifikation von Teilen einer Zeitreihe, welche in ähnlicher Weise wiederholt auftreten. Dabei sind weder die Anzahl der gesuchten Objekte noch deren Wiederholzeitpunkte bekannt. Sei ZR

³⁸ Dieses Verfahren wird aufgrund des Vorgehens anschaulich auch als „gleitendes Fenster“ bezeichnet.

³⁹ Durch spezielle Distanzmaße oder Vorverarbeitungsschritte ist es [FCL05], [Che05], [SLV06] dennoch gelungen Teilzeitreihen in einigen Fällen erfolgreich zu clustern.

eine Zeitreihe der Länge n , dann ist eine Teilzeitreihe TZR mit Länge $m < n$ als Sequenz aufeinanderfolgender Elemente aus ZR definiert. Für $1 \leq i \leq n - m + 1$ gilt⁴⁰:

$$TZR_i = elem(ZR, i), \dots, elem(ZR, i + m - 1) \quad (3.6)$$

Um festzustellen ob TZR mehrfach in ZR enthalten ist, wird zunächst ein Parameter R und eine Funktion T definiert. T prüft für zwei beliebige Teilzeitreihen TZR_i und TZR_j aus ZR ob diese als identisch betrachtet werden können. Dies ist genau dann der Fall, wenn die durch ermittelte Distanz bezüglich des maximalen Abstands nicht überschritten wird, d. h.:

$$T(TZR_i, TZR_j) = \begin{cases} \text{wahr}, & D(TZR_i, TZR_j) \leq R \\ \text{falsch}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.7)$$

Die Autoren unterscheiden weiterhin den trivialen Treffer tT . Sei ZR eine beliebige Zeitreihe welche die Teilzeitreihen TZR_i und TZR_j identischer Länge enthält. Damit ist die Trivialitätseigenschaft für TZR_j durch folgende Auswertung festzustellen:

$$tT(TZR_i, TZR_j) = \begin{cases} \text{wahr}, & T(TZR_i, TZR_j) \wedge (i = j \vee \beta) \\ \text{falsch}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\beta = \begin{cases} \text{wahr}, & \nexists TZR_k: D(TZR_j, TZR_k) > R \wedge ((j < k < i) \vee (i < k < j)) \\ \text{falsch}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.9)$$

Die Teilzeitreihe mit der höchsten Anzahl an nicht trivialen Treffern entspricht dem signifikantesten Motif (1-Motif) in der Zeitreihe. Wird die Definition auf alle Motifs einer Zeitreihe erweitert, so gilt (unter Zuhilfenahme der Funktion $AntT$ zur Bestimmung der Anzahl nicht trivialer Treffer) für das K -Motif, dass es die Teilzeitreihe TZR^K beschreibt, welche die folgende Bedingung für alle $1 \leq i < K$ erfüllt:

$$\arg \max(AntT(TZR^K) \mid D(TZR^K, TZR^i) > 2 * R) \quad (3.10)$$

Die gewählte Distanz von $2 * R$ sorgt dafür, dass eine Teilzeitreihe höchstens einem Motif zugeordnet werden kann. Nachdem die Terminologie vorgestellt wurde, soll der Ablauf zur Ermittlung des 1-Motif mit Hilfe von Tabelle 5 verdeutlicht werden.

⁴⁰ Die Funktion $elem(M, i)$ liefert das Element mit Index i der zeitlich geordneten Menge M .

Algorithmus: Berechne_1_Motif (ZR, n, R)	
1	$best_motif_count_so_far = 0;$
2	$best_motif_location_so_far = null;$
3	for $i = 1$ to $length(ZR) - l + 1$
4	$count = 0;$
5	$pointers = null;$
6	for $j = 1$ to $length(ZR) - l + 1$
7	if $non_trivial_match(TZR_{[i:i+n-1]}, TZR_{[j:j+n-1]}, R)$
8	$count = count + 1;$
9	$pointers = append(pointers, j);$
10	end;
11	end;
12	if $count > best_motif_count_so_far$
13	$best_motif_count_so_far = count;$
14	$best_motif_location_so_far = i;$
15	$motif_matches = pointers;$
16	end;
17	end;

Tabelle 5: Der 1-Motif Brute Force Algorithmus [Lin et al.02, S.56]

Der Algorithmus beschreibt für eine Zeitreihe ZR und dem Maximalabstand R ein iteratives Verfahren, bei dem jede Teilzeitreihe mit Länge n (äußere Schleife) mit allen anderen Teilzeitreihen (innere Schleife) der gleichen Länge verglichen wird. Nach jedem Durchlauf der äußeren Schleife sind die Anzahl der nicht trivialen Treffer sowie deren Indizes bekannt. Falls bezüglich der Trefferanzahl ein neues Maximum erreicht wurde, werden die beiden globalen Variablen aktualisiert. Als Resultat enthalten diese nach vollständigem Vergleich der Teilzeitreihen die relevanten Informationen des 1-Motifs.

Die Laufzeit des Algorithmus wächst quadratisch mit der Länge der Eingabezeitreihe. Eine Vielzahl weiterer Ausarbeitungen im Bereich des Motif Mining beschäftigt sich daher mit der Reduktion der Laufzeit zur Bestimmung eines Motifs. Zu diesem Zweck lassen sich sowohl heuristische Verfahren (wie z. B. in [RT04] oder [TIU05]) als auch exakte Verfahren ([Tat07], [Mue et al.09]) unterscheiden. Neben der verringerten Laufzeit der Methode motivieren die Autoren die Notwendigkeit der Beiträge mit dem Argument, dass durch den fortschreitenden Einsatz der Informationstechnologie in unterschiedlichsten Bereichen sehr große Datenbanken zur Analyse entstehen. Bezug neh-

ment auf die Problemdefinition aus Abschnitt 2 ist die zu erwartende Datenmenge jedoch kein Problem, da von einer täglichen Bedarfsanmeldung und einem begrenzten Produktlebenszyklus ausgegangen wird. Auf eine detaillierte Betrachtung der genannten Beiträge wird deshalb verzichtet.

Bei der Berechnung der Motifs durch den vorgestellten Algorithmus ist es notwendig den Parameter l , welcher die Länge des zu suchenden Objekts angibt, im Voraus zu kennen. Werden jedoch eine Menge von kundenbezogenen Bestellzeitreihen analysiert, so sind nicht nur die Muster, sondern auch deren jeweilige Länge unbekannt. In [TL08] wird gezeigt, dass bei zu klein gewähltem Parameterwert lediglich (mehrfache) Subsequenzen des eigentlichen Motifs gefunden werden können, während bei zu großem Wert ggf. gar keine Motifs auftreten. Das Problem verschärft sich weiter, wenn Regelmäßigkeiten verschiedener Länge in der jeweils zu analysierenden Datenbasis vorhanden sind. Aufgrund dieser Problematik schlagen die Autoren eine Methode über drei Phasen vor. Zunächst wird der bekannte Motif-Mining-Algorithmus mit relativ kleinem Parameterwert ausgeführt. Das Ergebnis der paarweisen Vergleiche wird in einer Kollisionsmatrix abgetragen, in der die Achsen durch die Startindizes der betrachteten Teilzeitreihen dargestellt sind. Ein Punkt in dieser Matrix bedeutet, dass die Ähnlichkeit der beiden Teilzeitreihen innerhalb der ähnlichsten k liegt. In der zweiten Phase werden die Treffer zusammengefasst, deren Punkte in der Kollisionsmatrix nahe beieinander liegen und einen Verlauf mit linearer, positiver Steigung aufweisen. Die abschließende Phase fasst gefundene Motifs anhand des Überschneidungsgrads zu den ursprünglich gesuchten Mustern zusammen. Problematisch ist in diesem Zusammenhang das der Parameter l , durch andere Parameter (Schwellenwert des Abstands, der Steigung und der Überschneidung) ersetzt wurde, dessen Wahl wiederum dem Anwender überlassen ist. Die Autoren des Beitrags [NNR11] betrachten ebenfalls die Problematik der Festlegung einer geeigneten Fensterbreite. Zu diesem Zweck wird ein parameterfreies Verfahren vorgestellt, das die Anzahl der möglichen Motiflängen signifikant reduziert und damit eher als vorgelagerter Schritt des eigentlichen Clusterings verstanden werden kann.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Methode des Motif Minings gut zur Identifikation der gesuchten Bestellregelmäßigkeiten geeignet ist, da keine potenziellen Einflussfaktoren fest zu modellieren sind, sondern die Auswirkungen beliebiger Schwankungsursachen analysiert werden. Es konnte jedoch kein Beitrag gefunden werden, welcher die definierten Anforderungen vollständig erfüllt.

3.2 Abbildung von Bedarfsunsicherheit

Die Berücksichtigung von Bedarfsunsicherheit bei der Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätssteuerung umfasst die zwei Phasen der Modellierung und Analyse von Bedarfsunsicherheit sowie deren Integration in das Planungsproblem. Nachfolgend werden daher in Abschnitt 3.2.1 zunächst Arbeiten vorgestellt, welche die Abbildung der Bedarfsunsicherheit auf unterschiedliche Art und Weise leisten, bevor in Abschnitt 3.2.2 bekannte Konzepte zur Integration der Unsicherheit und deren Wirkungsweise aufgezeigt werden.

3.2.1 Modellierung und Analyse von Bedarfsunsicherheit

Die in dieser Arbeit unterstellte kunden- und erzeugnisabhängige Bedarfsdynamik lässt sich in Bezug auf ihre Häufigkeit als regelmäßige Störung klassifizieren, da im Kontext der langfristigen Rahmenverträge eine Vielzahl von Bestellungen zu erwarten sind. Nach Gebhard kann die Bedarfsunsicherheit daher durch die Verwendung statistischer Methoden relativ gut quantifiziert werden (vgl. [Geb09, S.25–26]). Zu diesem Zweck existieren sowohl eine Vielzahl stetiger und diskreter Verteilungen zur Beschreibung der Unsicherheit (vgl. [PBK05, S.127–172]) als auch entsprechende Testverfahren zu dessen Auswahl und Parametrierung. Das grundsätzliche Prinzip dieser Tests besteht darin auf Basis der historischen Bestellinformationen (vgl. Abschnitt 2.1.1), also einer Stichprobe der unbekanntenen Verteilung, auf die zugrunde liegende tatsächliche Verteilung zu schließen, was den prognostischen Charakter des Vorgehens deutlich macht. Für weitere Details sei an [Tou05, S.165–186] verwiesen. Aufgrund ihrer besonderen Bedeutung soll auf die stetige Normalverteilung und die diskrete Häufigkeitsverteilung genauer eingegangen werden. Mit den Parametern des Mittelwerts μ und der Varianz σ^2 ist die Dichtefunktion f der Normalverteilung definiert durch:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.11)$$

Wegen des Verlaufs des Graphen der Dichtefunktion wird diese auch als Glockenkurve bezeichnet. Formal ist eine Achsensymmetrie bezüglich $x = \mu$ festzustellen, sodass positive und negative Schwankungen desselben Ausmaßes als gleich wahrscheinlich erachtet werden. Darüber hinaus sind Abweichungen nach beiden Seiten umso unwahrscheinlicher, je größer deren Wert ist. Vielfach wird der Bedarf im Bereich der Produktionsplanung als normalverteilt angesehen (vgl. [Bra06, S.3011], [Luc98, S.89], [SM06a]). Es ist jedoch kritisch anzumerken, dass die theoretische Verteilung die reale

Unsicherheit unter Umständen nur unzureichend approximiert. Dies ist insbesondere bei musterbasiertem Bestellverhalten der Fall, wie bereits in Abschnitt 2.3.1 und 2.3.2 erörtert wurde. Einige Autoren (vgl. beispielsweise [Tem05, S.34], [Dan09a]) betrachten nicht direkt den Bedarf, sondern den Prognosefehler als normalverteilt. Auch für diese Modellierung ist festzustellen, dass die Annahme im Fall systematischer Prognosefehler (beispielsweise durch musterbasierte Bedarfskorrekturen) zu einer fehlerhaften Einschätzung der herrschenden Bedarfsunsicherheit führt. Die Vorteile von theoretischen Verteilungen sind unter anderem durch die kompakte Darstellung von Verteilungsfunktionen bei großen Stichproben, die Eignung zu weitergehenden analytischen Betrachtungen sowie durch die relative Ausreißerstabilität zu begründen (vgl. [KS04, S.282]). Kann auf diese Aspekte verzichtet werden, so bietet sich die Beschreibung der Bedarfsunsicherheit durch Verwendung diskreter, empirischer Häufigkeitsverteilungen an. Anstatt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu schätzen, werden die vorliegenden n Elemente (im quasi stetigen Fall der Bedarfsabweichung) in m Intervalle eingeteilt, für die sich direkt relative Häufigkeiten berechnen lassen. „Die Häufigkeitsverteilung lässt sich unmittelbar als Wahrscheinlichkeitsfunktion interpretieren“ [KS04, S.280]. Die Maßzahlen des Mittelwerts μ und der (externen) Varianz σ^2 sind bei Klassenmittelwerten \bar{x}_i sowie Häufigkeiten n_i durch Formel (3.12) definiert.

$$\mu = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^m n_i * \bar{x}_i \qquad \sigma^2 = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^m n_i * (\bar{x}_i - \mu)^2 \qquad (3.12)$$

Vorteilhaft bei dieser Art von Verteilung ist, dass sie keinen theoretischen Annahmen entsprechen muss, sondern ihre Charakteristika ausschließlich durch die empirischen Realisationen bestimmt sind. Die Wahl der Klassenanzahl hängt nach Klein problem-spezifisch von der benötigten Genauigkeit der Entscheidungssituation ab. Erprobte, allgemeine Berechnungsvorschriften in Abhängigkeit der Stichprobe liefern [FD81], [Wan97] sowie [Sco79].

Neben dem angenommenen Typ von Verteilungsfunktion zur Beschreibung der Bedarfsunsicherheit lassen sich entwickelte Verfahren nach der Anzahl bzw. des Aggregationsniveaus der unsicheren Parameter unterscheiden. Es existieren Veröffentlichungen (beispielsweise [Tem07]) welche lediglich einen unsicheren Parameter zur Abbildung von Bedarfs-/Prognoseunsicherheit verwenden. Andere Autoren (wie zum Beispiel [PM97]) detaillieren jedoch auch feiner auf der Ebene unterschiedlicher Erzeugnisse. Vergleichsweise selten wird die Verteilung in Abhängigkeit der Perioden des Planungshorizonts gebildet. Die Analyse des kundenspezifischen Verhaltens ist im Allgemeinen kein Betrachtungsgegenstand, da von einem anonymen Massenmarkt bzw. nur kurzfris-

tigen Geschäftsbeziehungen ausgegangen wird. Weitere Alternativen finden sich im Fall der simultanen Berücksichtigung mehrerer Quellen von Unsicherheit, was jedoch nur indirekt Gegenstand dieser Arbeit ist und deren Vorstellung deshalb ausbleibt.

Grundsätzlich können die zur Abgrenzung bereits in Abschnitt 3.1.2 durch Tabelle 4 aufgeführten Methoden erweitert und zur Vorhersage der Bedarfsunsicherheit genutzt werden. Ein Großteil dieser Verfahren ist bereits Bestandteil moderner Advanced Planning Systeme (vgl. [GT05, S.330–342]). Darüber hinaus sind jedoch komplexere Konzepte zur Beurteilung der Bedarfsunsicherheit bekannt. In [Bre02] wird ein „hybrides Vorhersagesystem“ entwickelt, welches als allgemeines Vorgehensmodell zur intelligenten Analyse und Bewertung verstanden werden kann und daher mit Hilfe von Abbildung 11 vorgestellt wird.

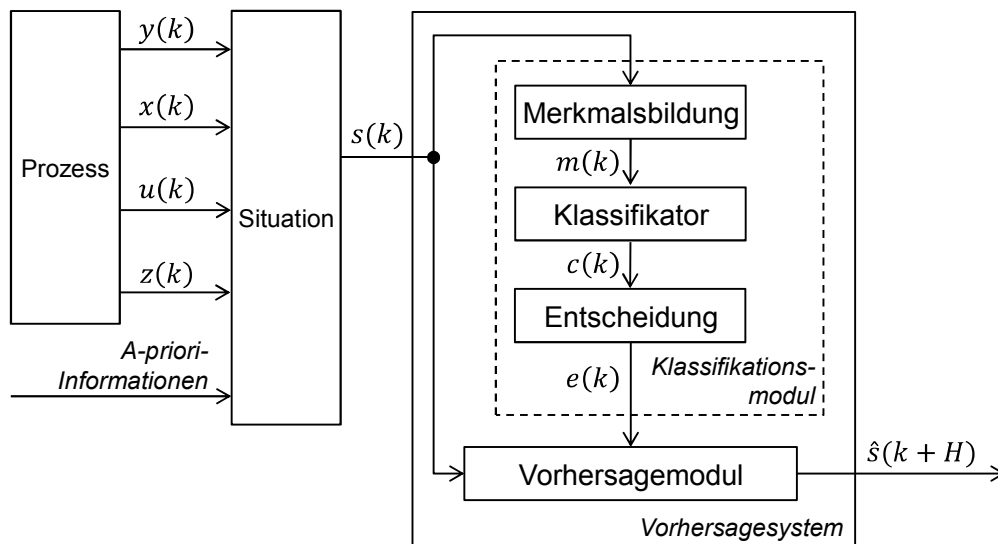


Abbildung 11: Struktur eines hybriden Vorhersagesystems [Bre02, S.38]

Ausgangspunkt der Betrachtung ist ein Prozess⁴¹, welcher durch die Informationen der Eingangs-, Ausgangs-, Zustands- und Störgrößen beschrieben wird. In Kombination mit weiteren A-priori-Informationen bilden sie zu einem beliebigen Zeitpunkt k die aktuelle Situation ab. Diese wird sowohl als Eingabeinformation im Vorhersage- als auch im Klassifikationsmodul zur weiteren Auswertung herangezogen. Das Klassifikationsmodul ermittelt aufgabenspezifisch auf Basis von zu bestimmenden Merkmalen die ähnlichste Klasse zur aktuellen Situation und liefert darauf aufbauend einen Entscheidungsvektor als weitere Eingabeinformation für das Vorhersagemodul. Dessen Aufgabe be-

⁴¹ „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder auch Informationen umgeformt, transportiert oder auch gespeichert wird“ [DIN19226].

steht in der Beschreibung der zukünftigen Situation \hat{s} für einen Horizont der Länge H durch den funktionalen Zusammenhang $\hat{s}(k + H) = f(s(k), e(k))$ (vgl. [Bre02, S.37–58]). Der Autor stellt im Weiteren die problemspezifische Ausgestaltung der einzelnen Komponenten für den Anwendungsfall der Prognose von Bedarfslastgängen in der Energiewirtschaft vor. Die Ermittlung der Muster beschränkt sich auf vorausgewählte Kriterien und wird zur Linearisierung des Lastgangs verwendet, wobei die eigentliche (kurzfristige) Vorhersage nachgelagert unter Verwendung stochastischer Prozesse in einwertiger Form durchgeführt wird.

Im Rahmen des DFG-Projekts „Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung der Disposition bei Serienfertigern“ wurden die vorliegenden historischen Bedarfsdaten in aufbereiteter Form an Hand statistischer Merkmale, die sich an der Zeitreihenanalyse orientieren, klassifiziert. Als Ergebnis konnten sieben typische Verbrauchsverläufe ermittelt werden für die jeweils das Prognoseverfahren bestimmt wird, welches den zu erwartenden Fehler in Abhängigkeit des betreffenden Verbrauchsverlaufs minimiert. Untersucht wurden die gleitende Mittelwertbildung, die exponentielle Glättung erster und zweiter Ordnung sowie das Saisonverfahren nach Winters. Die Prognose der Bedarfe erfolgt situationsbedingt durch Verwendung der geeignetsten Methode in Abhängigkeit des aktuellen Verbrauchsverlaufs. Durch Nachhalten der Prognosefehler wird eine Normalverteilung geschätzt und somit indirekt die Unsicherheit abgebildet. Darüber hinaus wird eine Wiederholung der Klassifikation nach spätestens sechs Monaten empfohlen um sich ändernde Verbrauchsverläufe rechtzeitig zu erkennen. Für weitere Details bezüglich des Projekts sei an [Luc98] verwiesen.

In der Arbeit von Holtze mit dem Titel „Data mining in der Bedarfsprognose von Komponenten und Teilen“ wird ein weiterer klassifikationsbasierter Ansatz mit verbrauchsorientiertem Charakter vorgeschlagen. Der Autor führt ein Fuzzy Clustering auf monatsbasierten, äquidistanten Mengenzeitreihen durch. Als Ergebnis liegt eine Menge von unscharf beschriebenen prototypischen Verbrauchsverläufen vor. Zum Planungszeitpunkt wird durch Ermittlung der Zugehörigkeitsgrade der zu prognostizierenden Zeitreihe zu den fortgeschriebenen Prototypen und einer anschließenden Gewichtung der jeweiligen Zeitreihenwerte eine einwertige, situationsbedingte Prognose durchgeführt. Ausführlichere Beschreibungen finden sich in [Hol00, S.113–127].

In [Bar06] wird ein mehrstufiges Modell zur Analyse und Gestaltung des Bestellverhaltens vorgestellt. Der bedarfsorientierte Betrachtungsgegenstand ist die Bestellung auf Kunden-/Erzeugnisebene, welche durch die Ausprägungen der Termin- und Mengendimension im Zeitverlauf definiert wird. Der zur Quantifizierung der Bedarfsunsicherheit relevante dritte Schritt ist zweigegliedert. Zunächst werden im Rahmen einer Grobanalyse auf Zeitreihen (je Dimension) anhand der Größen Streuung, Trend, Spannweite,

Minimal- und Maximalwert kritische Bereiche identifiziert. Im Rahmen der zweiten Phase werden die Einzelereignisse der letzten Veränderung einer Bestellreihe sowie die Bestellentwicklung im Betrachtungszeitraum analysiert. Für Letztere werden beispielhafte Möglichkeiten zur Auswertung mittels Häufigkeitsverteilungen genannt. Dies umfasst u. a. die Betrachtung der Anzahl an Schwankungen, deren durchschnittliche Größe sowie die Verteilung der Schwankungsarten. Zur Bewertung der Güte des Bestellverhaltens werden elementare Kennzahlen in Bezug auf die Bestellentwicklung und die letzte Bestelländerung definiert. Die Messergebnisse werden sowohl typischen Schwankungsbildern als auch eigens definierten Risikoklassen zugeordnet. Eine operationalisierte Methodik zur Beurteilung der quantitativen Bedarfsunsicherheit für eine gegebene Bestellsituation bleibt allerdings aus.

Einen kennzahlenbasierten Ansatz stellt das Projekt „Dynamik-Monitoring für Zulieferunternehmen (DynaMoZ) dar. Im Bereich der Analyse von Nachfragedynamik wurde zwischen den Kriterien der verbrauchsorientierten Nachfragevolatilität (tatsächlich gewünschte Mengen im Zeitverlauf) und der bedarfsorientierten Vorhersagegüte (Entwicklung einer Menge bis zur realisierten Bestellung) differenziert. Es wurden jeweils Kennzahlen bestimmt und geeignet aggregiert, um die Nachfragedynamik auf Erzeugnisebene in ein eigens entwickeltes, aus vier Sektoren (stabil, pseudo-turbulent, turbulent, stochastisch) bestehendes Portfolio klassifizieren zu können. Das Verfahren zielt allerdings weniger auf die Prognose zukünftiger Bedarfsunsicherheit ab, sondern fokussiert auf die Gestaltung der Prozesse zur Vermeidung der zugrunde liegenden Ursachen. Detaillierte Ausführungen bezüglich entwickelter Normstrategien zur Zielerreichung sind in [IPH03] zu finden. Für zwei weitere Kennzahlen sowie Schemata zur Klassierung der Vorhersagegüte sei darüber hinaus an [VDA5009] verwiesen.

Es sei erwähnt, dass auch Neuronale Netze zur Analyse der Bedarfsunsicherheit eingesetzt werden (vgl. [Cro08, S.239–312], [Hol00, S.91–112], u. a. m.). Auf eine Vorstellung der Beiträge wird jedoch verzichtet, da mit der verwendeten Methode zwei wesentliche Nachteile einhergehen. Ein vorhandener Mangel an Transparenz resultiert daraus, dass sich die (nach der Lernphase) vorhandenen Gewichte äußerst schlecht interpretieren lassen. Im Allgemeinen ist daher nicht bekannt auf welcher Grundlage Entscheidungen getroffen werden. Auch ein manueller Eingriff, etwa das Hinzufügen, Entfernen oder Anpassen relevanter Muster, ist nicht möglich. In Kombination kann dies bei den Entscheidungsträgern zu einem Akzeptanzproblem führen. Darüber hinaus wird die Lernphase vor allem bei komplexeren Netzen als vergleichsweise aufwendig eingeschätzt, was im Widerspruch zur verfügbaren Menge an historischen Bestellreihen steht (vgl. [Mit97, S.85], [Leh05, S.513]).

3.2.2 Integration von Bedarfsunsicherheit in mathematische Optimierungsprobleme

Die Steuerung der Entscheidungsgrößen basiert auf einem formalen Planungsmodell. Für ein zu minimierendes Zielkriterium z , den zu treffenden Entscheidungen x sowie gegebenen Parametern A, b, c kann das Modell durch ein gemischt ganzzahliges Optimierungsproblem definiert werden. Nach [BL97, S.51] gilt:

$$\begin{aligned} \min z &= c^T * x \\ \text{u. d. N. } A * x &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Zur modellbasierten Entscheidungsunterstützung unter Unsicherheit ist zwischen deterministischen Ersatzmodellen und stochastischen Modellen (respektive deren deterministisches Äquivalent) zu unterscheiden. Grundgedanke der Ersatzmodelle ist die Unsicherheit noch vor Optimierung auf eine spezielle Ausprägung zu reduzieren und das verbleibende Problem durch Formel (3.13) zu lösen. Das zu betrachtende Szenario kann je nach Zielvorgabe bestimmt werden. In Bezug auf Bedarfsunsicherheit lassen sich im Wesentlichen unterscheiden:

- **Erwartungswertbasierte Betrachtung:** Die unsicheren ergebnisabhängigen Periodennachfragen werden durch die erwartete Nachfrage (z. B. gewichteter Mittelwert, vermutete Zu-/Abschläge) ersetzt.
- **Extremwertbasierte Betrachtung:** Die unsicheren ergebnisabhängigen Periodennachfragen werden durch die maximale / minimale Nachfrage ersetzt.
- **Anspruchsniveaubasierte Betrachtung:** Auf Basis der stochastischen Bedarfsinformationen wird beispielsweise das Szenario bestimmt, welches mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit die Nachfrage erfüllt.

Es ist kritisch anzumerken das diese Art der Integration von unsicheren Bedarfen unweigerlich die in Abschnitt 2.2.3 beschriebene Problematik nahezu unberücksichtigt lässt. Soll die Bedarfsunsicherheit bei der Entscheidungsfindung explizit betrachtet werden, so wird Formel (3.13) in Anlehnung an [BL97, S.84] zum deterministischen Äquivalent eines zweistufigen stochastischem Problems mit fester Kompensation erweitert⁴²:

⁴² Alternativ existiert die Chance Constraint Modellierung, welche durch wahrscheinlichkeitsrelaxierte Nebenbindungen in einigen Fällen unzulässige Lösungen erlaubt (vgl. [Geb09, S.29–30]) und daher unberücksichtigt bleibt. Vielstufige Modelle welche die Bedarfsunsicherheit im Kontext der rollieren-

$$\begin{aligned}
\min z &= c^T * x + \sum_{\omega=1}^{\Omega} q(\omega)^T * y(\omega) \\
\text{u. d. N. } &A * x = b \\
&T(\omega) * x + W * y(\omega) = h(\omega) \\
&x \geq 0, y(\omega) \geq 0
\end{aligned}
\tag{3.14}$$

Die erste Stufe umfasst die Variablen x für die noch vor Realisierung der Unsicherheit eine Entscheidung irreversibel zu treffen ist. Die Variablen der zweiten Stufe y bilden die Maßnahmen ab, welche erst nach Auflösung der Unsicherheit festzulegen sind. Sie bauen damit auf Stufe eins auf und werden als Kompensationsentscheidungen bezeichnet⁴³. Eine grafische Darstellung des Zusammenhangs findet sich in [Gan09, S.55].

Nach Abschnitt 2.3.2 kann von einer notwendigen Reduktion des Wahrscheinlichkeitsraums zur Menge Ω ausgegangen werden. Das meist verbreitete Verfahren zur Problembewältigung wird als Sampling bezeichnet (vgl. [DS12]). Bei gegebenen stetigen oder diskreten Verteilungen wird anhand von Zufallszahlen⁴⁴ unter Berücksichtigung der Dichtefunktion bzw. der Klassengewichte eine Menge von Alternativen je Verteilung ermittelt und anschließend deren kartesisches Produkt gebildet. Um das exponentielle Wachstum zu vermeiden, kann die Kombination zu Szenarien an der Reihenfolge der ermittelten Alternativen je Verteilung ausgerichtet werden. Mit steigender Anzahl an Szenarien konvergiert das Szenarioset gegen die tatsächliche Verteilung. Eine Erweiterung dieses Vorgehens wird als Latin Hypercube Sampling (LHS) bezeichnet und reduziert durch Aufteilung der kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilung in gleich große Intervalle aus denen gesampelt wird die benötigte Anzahl der Szenarien zur zweckmäßigen Abbildung der Unsicherheit (vgl. [MCB79]). Mit dem gleichen Ziel wurden darüber hinaus Quasi Zufallszahlen entwickelt, welche eine besonders hohe Güte bezüglich formaler Gleichmäßigkeitskriterien erfüllen. Beispielhaft seien hier die Sobol, Niederreiter sowie Faure Reihen genannt (vgl. [Lev02]). Anwendung findet das Sampling unter anderem im Fall der rollierenden, mehrperiodischen Produktionspla-

den Planung noch detaillierter abbilden könnten bleiben aufgrund der drastischen Komplexitätssteigerung bei tendenziell geringem Genauigkeitsgewinn (wegen kurzer Planabstände) ebenfalls unberücksichtigt (vgl. [Cui10, S.3–4]).

⁴³ Neben der durch Formel (3.14) dargestellten Zielfunktion können alternative Risikoeinstellungen in Form von *MinMax* oder *MinMin* (im Fall eines Minimierungsproblems) Zielfunktionen abgebildet werden (vgl. [Sch01, S.134–135]). Liegen jedoch auswertbare historische Informationen vor, widerspricht deren Verwendung der mittelfristigen Zielerreichung.

⁴⁴ Es können sowohl „echte“ Zufallszahlen (häufig als Messergebnis physikalischer Abläufe) als auch durch Computer berechnete Pseudo-Zufallszahlen eingesetzt werden.

nung in der chemischen Prozessindustrie unter Bedarfsunsicherheit (vgl. [WI07, S.1130], [BEP08, S.1695]), bei vorgelagerten taktischen Designentscheidungen (vgl. [SPR94, S.2690–2691]) oder bei der Modellierung stochastischer Ausspeiselasten in einem Gastransportnetz (vgl. [Koc et al.11]). Alternative Methoden der Szenariogenerierung sind u. a. die Momenten Anpassung, die optimale Diskretisierung oder die interne Betrachtung durch Gaußsche Quadratur. Da allerdings weniger das verwendete Verfahren, als dessen problemspezifischer Einsatz über die Zweckmäßigkeit der Szenariogenerierung entscheidet (vgl. [KW07]), sei für eine umfassende Erläuterung hinsichtlich dieser Methoden und beispielhaften Anwendungen an [Cut07] sowie [BL97, S.340ff] verwiesen.

3.3 Steuerung der Produktionsentscheidungen bei gegebener Bedarfsunsicherheit

Die gewinnmaximierende Steuerung der Entscheidungsgrößen bei gegebener Bedarfsunsicherheit lässt sowohl indirekt als Lagerhaltungsproblem, als auch direkt in Form eines Produktionsablaufplanungsproblems betrachten. Infolge sollen daher Arbeiten beider Sichtweisen vorgestellt werden.⁴⁵

3.3.1 Ansätze auf Basis von Lagerhaltungspolitiken

Wird das in Abschnitt 2 formulierte Problem aus Sicht der Lagerhaltung betrachtet, müssen zu jedem Zeitpunkt die Mengen der betrachteten Erzeugnisse vorrätig sein, so dass der mittelfristige Gewinn maximiert wird. Damit lassen sich zur Problemlösung gegebenenfalls die entwickelten Verfahren aus dem Bereich der Lagerhaltungspolitiken heranziehen. Jedes Lagerhaltungssystem ist durch die vier Komponenten des Bedarfs, der Beschaffung, den Kosten und den Nebenbedingungen bestimmt [Nad71, S.29]. Der Beschaffung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da dieser Komponente die Entscheidungsvariablen zugeordnet werden, über die der Planer die Wirtschaftlichkeit des Lagerhaltungssystems direkt beeinflussen kann. Aus den Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Bestellmengen und die Bestellzeitpunkte ergeben sich die vier grundsätzlichen Lagerhaltungspolitiken⁴⁶ (vgl. [DSV97, S.168]):

⁴⁵ Auf die Analyse der Eignung von Methoden der Auftragsfreigabe wird verzichtet, da deren Unzulänglichkeit in Bezug auf vergleichbare Anforderungen (im deterministischen Fall) durch [Bro11, S.36–39] dargestellt wurde und im Fall unsicherer Bedarfsentwicklungen tendenziell zunimmt.

⁴⁶ Die Bestellpunktpolitiken werden durch Tripel modelliert wenn statt der kontinuierlichen Zeit eine diskrete Zeitachse und damit von periodenweisen Überwachungszyklen ausgegangen wird.

- **(s,S)-Politik:** Sobald der disponible Lagerbestand die Höhe des Bestellpunktes s erreicht, wird die Bestellmenge ausgelöst, welche zum Niveau S führt.
- **(s,q)-Politik:** Sobald der disponible Lagerbestand kleiner gleich der Höhe des Bestellpunktes s ist, wird die Menge die fixe Menge q bestellt.
- **(r,S)-Politik:** Alle r Perioden wird eine Bestellung ausgelöst, die den derzeitigen Lagerbestand des Erzeugnisses auf Niveau S anhebt.
- **(r,q)-Politik:** Alle r Perioden erfolgt die Bestellung der fixen Menge q .

Den anderen drei Komponenten des Bedarfs, der Kosten und den Nebenbedingungen kommt dabei die Bedeutung der Zustandsparameter zu, die nicht direkt beeinflussbar sind. Eine Übersicht bezüglich möglicher Ausprägungen der Parameter liefert Tabelle 6.

Unsicherheit des Bedarfs	Deterministisch		Stochastisch	
Schwankung des Bedarfs	Stationär	Instationär	Stationär	Instationär
Unsicherheit der Wiederbeschaffungszeit	Keine Lieferzeit	Deterministisch		Stochastisch
Schwankung der Wiederbeschaffungszeit	Keine	Stationär	Instationär	Stationär Instationär
Berücksichtigung von (Absatz-) Fehlmengen	Keine	Durch Fehlmengenkosten		Durch Servicegrade (SG)
Art der Fehlmengen	Keine	Im Vormerckfall	Im Verlustfall	α -SG β -SG
Berücksichtigung von Liefer-Fehlmengen	Keine	Liefer-Fehlmengenkosten	Liefer-Servicegraden	
Anzahl der Dispositionsstufen	Einstufig	Zweistufig		Mehrstufig
Anzahl der Produkte	Einprodukt-Modelle		Mehrprodukt-Modelle	
Kapazitätsrestriktionen	Keine Ressourcen- und Kapazitätsrestriktionen		Ressourcen- und Kapazitätsrestriktionen	
Konstanz der Parameter	Konstante Parameter		Variable Parameter	
Umfang des Planungszeitraums	Einperiodig und endlich	Mehrperiodig und endlich		Unendlicher Planungszeitraum

Tabelle 6: Systematik der Strukturdimensionen von Bestellmengenmodellen (vgl. [Cro08, S.40])

Der Bedarf ist die zentrale Komponente eines Lagerhaltungssystems, da es ausschließlich zu dessen ökonomischer Erfüllung besteht und dessen Spezifikation die Komplexität der Analyse maßgeblich determiniert (vgl. [Nad71, S.29–33]). Der in dieser Arbeit

betrachtete instationär-stochastische Bedarf erscheint als genaueste Annäherung der vier Möglichkeiten in Bezug auf die Lagerhaltungswirklichkeit. Für diesen Fall existieren aufgrund der Schwierigkeit einer analytischen Betrachtung erst wenige Bestellmengenmodelle (vgl. [Cro08, S.59f]). Das Problem kann jedoch nach Crone im Rahmen der rollierenden Planung durch Verwendung eines geeigneten Prognoseverfahrens und der abgeleiteten Annahme eines stationär verteilten Prognosefehlers auf jenes der stationär-stochastischen Problemklasse zurückgeführt werden. Einen Überblick bezüglich Veröffentlichungen dieser Problemklasse liefert z. B. [SPP98, S.232–312] oder [Cro08, S.47–62]. Häufig wird bei der Analyse und Modellierung von Lagerhaltungssystemen lediglich von einem einzelnen Erzeugnis ausgegangen, wobei das resultierende Modell gegebenenfalls für mehrere Erzeugnisse unabhängig angewendet wird. Ein wesentlicher Kritikpunkt an diesen Modellen ist die Vernachlässigung möglicher Kosteneinsparungen durch gemeinsame Bestellung mehrerer Produkte (vgl. [Ass76, S.57–59]). Es wird des Weiteren angemerkt, dass sich die Problematik im Falle der Eigenproduktion (wie sie in dieser Arbeit unterstellt wird) weiter verschärft. Eine Übersicht bezüglich Mehrproduktmodellen und dessen Anwendung findet sich in [Ass76, S.59–91] sowie [Has79, S.261–429]. Infolge der Mehrproduktannahme, weiteren Nebenbedingungen und Kosten welche im direkten Zusammenhang mit dem zeitlichen Produktionsablauf sowie der Allokation von Betriebsmitteln stehen, müsste der Produktionsprozess in den Mittelpunkt der Betrachtung rücken, um ein realitätsnahes Lagerhaltungssystem abzubilden. Der Wirklichkeitsnähe von Modellen der Bestellmengenrechnung sind jedoch Grenzen gesetzt, die zu einer Weiterentwicklung unter Betrachtung ausschließlich ausgewählter Determinanten geführt haben [Cro08, S.41]. Dies zeigt sich auch in besonders praxisnahen Veröffentlichungen wie z. B. [Luc98], in der ein Verfahren der Bestellmengenrechnung für Serienfertiger mit Bedarfsschwankungen vorgestellt wird, welches jedoch ebenfalls von zahlreichen Anforderungen abstrahiert. Zusammenfassend muss konstatiert werden, dass auf Grundlage der hier gegebenen Anforderungen die vereinfachte, indirekte Betrachtung des Produktionsablaufs nicht zweckmäßig erscheint. Auf eine detailliertere Aufarbeitung einzelner Forschungsergebnisse wird daher verzichtet.

3.3.2 Ansätze der Produktionsablaufplanung

Wird das Prinzip rollierender Horizonte unterstellt (vgl. Abschnitt 2.1.5), so können eine Vielzahl von entwickelten Verfahren zur Produktionsablaufplanung bei Bedarfsunsicherheit eingesetzt werden. Frühe Modellformulierungen betreffen die einstufige, kapazitierte Mehrproduktfertigung in Form des „Capacitated Lotsizing Problem (CLSP)“

und sind der Klasse der Big Bucket⁴⁷ Modelle zuzuordnen (vgl. [Sue05, S.14–15]). Trotz zahlreicher praxisnaher Erweiterungen (vgl. [JD08]) führt diese Eigenschaft im Allgemeinen zu einer verminderten Kontrolle des zeitlichen Produktionsablaufs. Die Modellklasse eignet sich daher eher zur mittelfristigen Planung, weshalb auf eine detaillierte Betrachtung verzichtet wird. Das „Discrete Lotsizing and Scheduling Problem (DLSP)“, bildet als Small Bucket Modell die geforderte, simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung explizit ab (vgl. [Fle90]). Die Einteilung des Planungshorizonts in eine fixe Anzahl überschneidungsfreier, gleich großer Perioden führt jedoch bei feiner zeitlicher Auflösung zu hoher Komplexität. Durch eine Verallgemeinerung der beiden genannten Modelle zum „General Lotsizing and Scheduling Problem (GLSP)“ wird dieser Kritikpunkt beseitigt. Die Formulierung kann daher als geeignetes Grundlagenmodell betrachtet werden, das die beiden bekannten Konzepte der Small und Big Bucket basierten Planung zu einem hybriden Ansatz kombiniert und damit als Spezialfall auch enthält (vgl. [FM97]). Die elementare Idee besteht in der Abbildung der externen Dynamik durch ein fixes, diskretes Zeitraster (Makroperioden), wohingegen die interne Dynamik der Systemzustandswechsel jederzeit auftreten kann und daher durch überschneidungsfreie Perioden mit variabler Länge (Mikroperioden) abgebildet wird (vgl. [FM97, S.12]). Durch diese zwei Ebenen Zeitstruktur aus Mikro- und Makroperioden eignet sich das GLSP insbesondere als Basis zur Integration der simultanen Kapazitätsplanung ohne nachteilige Auswirkungen im Hinblick auf weitere Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.1.4) aufzuweisen. Angesichts der hohen Bedeutung des Modells zur Problemlösung soll nachfolgend die vorgeschlagene Formalisierung durch ein gemischt ganzzahliges Optimierungsproblem dargelegt werden.

Mengen:

J	Menge der Produkte
$S, (S_t)$	Menge der Mikroperioden (bezüglich Makroperiode t)
T	Menge der Makroperioden

Parameter:

K_t	Verfügbare Kapazität in Zeiteinheiten (ZE) in Makroperiode t
a_j	Kapazitätsbedarf (ZE) zur Produktion einer Einheit von Erzeugnis j

⁴⁷ Es lassen sich Big Bucket und Small Bucket Modelle unterscheiden. Die jeweilige Eigenschaft drückt dabei aus, „[...] wie die Länge eines Zeitabschnitts des Kalenders, der einem Produktionssystem, einem Knoten oder einem Punkt im Modell zugeordnet ist, in Relation zur Ereignisdichte in der originären Produktion gesetzt wird“ [Dan09b, S.255].

m_j	Minimale Losgröße für Erzeugnis j
h_j	Lagerkosten je Makroperiode und Mengeneinheit (ME) für Erzeugnis j
$s_{i,j}$	Rüstkosten je Umstellung der Produktion von Erzeugnis i auf Erzeugnis j
$d_{j,t}$	Bedarf (ME) für Produkt j in Makroperiode t
$I_{j,0}$	Initialer Lagerbestand (ME) für Produkt j
$y_{j,0}$	Initialer Rüstzustand für Produkt j (=1 falls gerüstet, 0 sonst)

Variablen:

$I_{j,t}$	Lagerbestand (ME) für Erzeugnis j am Ende der Makroperiode t
$x_{j,s}$	Produktionsmenge (ME) von Erzeugnis j , in Mikroperiode s
$y_{j,s}$	Rüstzustand für Erzeugnis j in Mikroperiode s (=1 falls gerüstet, 0 sonst)
$z_{i,j,s}$	Rüstvorgang von Erzeugnis i auf Erzeugnis j zu Beginn von Mikroperiode s (=1 falls Rüstvorgang erfolgt, 0 sonst)

Mathematisches Modell:

$$\text{Min} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} h_j * I_{j,t} + \sum_{i \in J} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} s_{i,j} * z_{i,j,s} \quad (3.15)$$

$$I_{j,t} = I_{j,t-1} + \sum_{s \in S_t} x_{j,s} - d_{j,t} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (3.16)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{s \in S_t} a_j * x_{j,s} \leq K_t \quad \forall t \in T \quad (3.17)$$

$$x_{j,s} \leq \frac{K_t}{a_j} * y_{j,s} \quad \forall j \in J, s \in S \quad (3.18)$$

$$x_{j,s} \geq m_j * (y_{j,s} - y_{j,s-1}) \quad \forall j \in J, s \in S \quad (3.19)$$

$$\sum_{j \in J} y_{j,s} = 1 \quad \forall s \in S \quad (3.20)$$

$$z_{i,j,s} \geq y_{i,s-1} + y_{j,s} - 1 \quad \forall i, j \in J, s \in S \quad (3.21)$$

$$I_{j,t}, x_{j,s}, z_{i,j,s} \geq 0, \quad y_{j,s} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in J, s \in S, t \in T \quad (3.22)$$

Die Zielfunktion minimiert in Form von Formel (3.15) die summierten Lager- und reihenfolgeabhängigen Rüstkosten. Zur bedarfserfüllenden Produktion modelliert die Lagerbilanzgleichung (3.16) den Verlauf der Bestände im Planungshorizont. Darüber hinaus garantiert Formel (3.17) die Einhaltung der gegebenen Kapazität je Makroperiode. Ungleichung (3.18) bindet die Produktion an den entsprechenden Rüstzustand, wobei Gleichung (3.20) für deren Konsistenz sorgt. Die Kopplung der Rüstzustände an die Rüstvorgänge leistet Formel (3.21). Abschließend definiert Ungleichung (3.19) die minimale Losgröße und (3.22) die Nichtnegativitätsbedingungen sowie die Binärvariablen. In [Mey00] wird das Modell erneut aufgegriffen und um reihenfolgeabhängige Rüstzeiten erweitert. Der zusätzliche Aspekt paralleler Produktionslinien wird durch [Mey02] ergänzt und die resultierende Komplexitätssteigerung durch Entwicklung problemspezifischer Meta-Heuristiken bewältigt. In [KS05] wird gezeigt, dass die ursprüngliche Formulierung den Rüstzustand nur dann in die nächste Periode überträgt, wenn die verfügbare Kapazität der vorherigen Periode den Zeitbedarf zur Herstellung der minimalen Losgröße übersteigt. Formel (3.19) wird zur Problemvermeidung geringfügig modifiziert. Durch [Sta02, S.126–167] wird die ursprüngliche Modellierung hinsichtlich der Zeitstruktur, der Berechnung von Leerperioden sowie der Abbildung der Lagerdauer modifiziert, um darauf aufbauend eine mehrstufige Modelldefinition zu konzipieren. Nach Recherche des Autors sind keine weiteren relevanten Modellformulierungen bekannt. Da sich einzelne Aspekte der zuvor genannten Problemklassen des CLSP und DLSP jedoch auf das GLSP übertragen lassen, schließt sich die Erläuterung ausgewählter, besonders praxisnah erweiterter Modellvarianten dieser Problemklassen an.

In [Brü10] wird ein mehrstufiges Produktionsablaufplanungsproblem betrachtet, welches nach dem Prinzip des Flexible Flow Shops organisiert ist. Neben praxisnahen Annahmen wie den reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten, beschränkten Pufferkapazitäten, verschiedenen qualitativen und quantitativen Kapazitäten der parallelen Maschinen wurde darüber hinaus eine Schichtplanung integriert. Dies ermöglicht insbesondere durch variable Leistungsgrade die flexible Anpassung des Kapazitätsangebots und liefert die Grundlage um auf unerwartete Störungen geeignet reagieren zu können. Zur Realisierung der Potenziale des dynamischen Planungsumfelds basiert das entwickelte Verfahren auf dem Prinzip rollierender Horizonte. Methodisch wird das Planungsproblem durch ein neu konzipiertes Small Bucket Modell mit einer Zwei Ebenen Zeitstruktur unter Verwendung der gemischt ganzzahligen Modellierung formal abgebildet. Die Berechnung eines Produktionsplans erfolgt in jedem Planungszyklus in Form der optimalen Anpassungsplanung, indem die gewichtete Summe aus Verzugs-, Produktions-, Lager- und Umplanungskosten bei Einhaltung aller Restriktionen minimiert wird. Zu

diesem Zweck werden sowohl eigens entwickelte Meta Heuristiken als auch ein Standardsolver eingesetzt. Das konzipierte Modell bildet den Produktionsprozess zwar sehr genau ab, verursacht allerdings auch eine hohe Komplexität. Dies ist vor allem auf die Mehrstufigkeit, die detaillierte und integrierte Schichtplanung sowie auf die verwendete Zeitstruktur zurückzuführen. Ein ausreichend dimensionierter Planungshorizont wird durch ein zusätzliches Grobplanungsmodell ermöglicht, welches jedoch nur schwach mit der Feinplanung gekoppelt ist. Eine explizite Integration der Bedarfsunsicherheit erfolgt nicht, sodass ausschließlich die zum Planungszeitpunkt gegebene Bedarfssituation reaktiv Berücksichtigung findet.

Ein weiteres Verfahren der operativen Produktionsablaufplanung welches unter Bedarfsunsicherheit anwendbar ist findet sich in [Bro11]. In dieser Arbeit wird ausschließlich für die Engpassstufe eines mehrstufigen Produktionsprozesses ein gemischt ganzzahliges Optimierungsproblem entwickelt. Insbesondere dem Feinplanungsmodell liegen wiederum zahlreiche praxisnahe Annahmen zugrunde, sodass ein Grundmodell des DLSP umfangreich erweitert wurde. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um die Integration einer Schichtplanung, einer Rüstteamplanung, die Berücksichtigung von Instandhaltungsvorgängen, die Abbildung der coilorientierten Produktion, die Einhaltung von Ladungsträgervielfachen Produktionsmengen und einer Methode zur Reduktion negativer Nebeneffekte des verwendeten Konzepts der rollierenden Planung. Der Autor erläutert, dass angesichts der Bedarfs- und Prozessunsicherheit die Feinplanung über einen längeren Horizont nicht zweckmäßig ist und reduziert daher die Komplexität durch Teilung des Horizonts in zwei Bereiche mit jeweils angepasstem Detaillierungsgrad. Das Grobplanungsmodell basiert auf einem CLSP und ist an das Modell der Feinplanung gekoppelt, sodass ein Kapazitätsausgleich grundsätzlich ermöglicht wird. Das entwickelte mathematische Modell der Feinplanung formalisiert die Zielfunktion als Summe von Rüstteamkosten, reihenfolgeabhängigen Rüstkosten, Coilwechselkosten, Produktionskosten, Wartungskosten und Lagerkosten. Ziel des Verfahrens ist die Minimierung der Gesamtkosten und die Sicherstellung der Lieferfähigkeit unter Berücksichtigung aller praktischen Restriktionen. Wie bereits im zuvor dargestellten Konzept ist anzumerken, dass eine explizite Betrachtung der Bedarfsunsicherheit nicht erfolgt, sondern ausschließlich reaktiv die zum Planungszeitpunkt gegebene Bedarfssituation Berücksichtigung findet.

Die Integration von Unsicherheit in den Entscheidungsfindungsprozess erhöht die Komplexität im Allgemeinen deutlich, weshalb bekannte Beiträge häufig vergleichsweise einfache Planungsprobleme zugrunde legen. Ein Modell mit präventivem Charakter wird beispielsweise für den Fall der einstufigen Produktion eines Erzeugnisses in [RA05] beschrieben. Die Autoren gehen von einem diskreten Planungshorizont aus,

wobei mögliche Nachfragekombinationen durch eine Menge von Szenarien gegeben sind. Es wird ein zweistufig stochastisches Modell vorgeschlagen, dessen Zielfunktion die erwartete Summe aus Rüst-, Produktions-, Lager- und Fehlmengenkosten minimiert. Die Kompensationsentscheidungen werden durch die Lagerbestands- und Fehlmengenvariablen abgebildet. In [Bra06] wird eine stochastisch mehrstufige Variante des CLSP vorgestellt, um die zuvor genannten Kosten im Rahmen des Konzepts der Rollierenden Horizonte zu minimieren. Aufgrund der enormen Komplexität werden effiziente Modellformulierungen und eine Lösungsheuristik nach der Relax & Fix Strategie⁴⁸ vorgestellt, wobei die Partitionierung am Zeitindex der Rüstvariablen ausgerichtet ist. Mit der vergleichsweise einfachen Heuristik konnten bereits gute Ergebnisse erzielt werden. Die integrierte Reihenfolge- und Losgrößenplanung bei stochastischer Nachfrage und signifikanten Rüstzeiten für die einstufige Produktion mehrerer Produkte wird in [SM97] erläutert. Wiederum werden Rollierende Horizonte angenommen, um der herrschenden Informationsdynamik gerecht zu werden und die Lager-, Rüst-, Fehlmengen- und Produktionskosten zu minimieren. Die Modellkomplexität wird durch eine lagrangebasierte Dekomposition bewältigt. Einen Zwei-Phasen Ansatz zur Planung unter Bedarfsunsicherheit verfolgen die Autoren in [WI07]. Zunächst werden durch ein stochastisch mehrstufiges Grobplanungsmodell, welches den Planungshorizont in drei Bereiche aufteilt (Bedarfe bekannt, Bedarfe schwanken leicht, Bedarfe schwanken stark), Bestellungen in den Planungsperioden zusammengefasst. Im Rahmen der rollierenden Horizonte erfolgt die Übermittlung der Bedarfe des jeweils aktuellen Bereichs an das Modell der Reihenfolgeplanung. Die Autoren argumentieren, dass die Ergebnisse der beiden Phasen zwar durch einen iterativen Prozess nachträglich angenähert werden müssen, die Komplexitätsreduktion diesen Nachteil jedoch überwiegt.

Eine Ausarbeitung welche die Problematik der Bedarfsunsicherheit detailliert und unter praxisnahen Bedingungen betrachtet findet sich in [Cui10]. Der Autor untersucht das mittelfristige Produktionsplanungsproblem im Kontext einer existierenden Anlage zur Herstellung von expandiertem Polystyrol (EPS). Aufbauend auf vorherigen Arbeiten in denen ein deterministisches, gemischt ganzzahliges Modell zur Abbildung des Planungsproblems entwickelt wurde, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der expliziten Betrachtung multipler Unsicherheiten, z. B. bezüglich künftiger Bedarfe, Kapazitäten und Erlöse. Aus diesem Grund wird die bestehende Formulierung zum deterministischen Äquivalent eines zweistufig stochastischen Modells mit fester Kompensation erweitert,

⁴⁸ Wird nach dem Relax & Fix Prinzip vorgegangen, ist die Lösung des Optimierungsmodells iterativ zu generieren. Dazu wird in jedem Schritt durch Relaxation von ganzzahligen Variablen ein weniger komplexes Teilproblem erzeugt und im Anschluss gelöst. Eine Teilmenge der resultierenden Variablenwerte ist fortan als fixiert zu betrachten. Der Prozess terminiert wenn alle Variablen fixiert wurden [PW06, S.109–110].

um den erwarteten Gewinn (Erlös abzüglich Lager-, Fehlmengen-, Produktions- und Rüstkosten) zu maximieren. Ein vorgestellter Lösungsansatz zur Bewältigung der Modellkomplexität basiert auf dem Konzept der rollierenden Horizonte und einer Zweiteilung des Planungshorizonts. Es wird vorgeschlagen die Unsicherheiten lediglich im Nahbereich szenariobasiert zu berücksichtigen und im zweiten Teil des Planungshorizonts die erwarteten Ausprägungen der unsicheren Parameter zu unterstellen, da die entfernte Zukunft vergleichsweise geringen Einfluss auf die Gegenwart ausübt. Eine Verallgemeinerung dieser Argumentation auf die Abbildungsgenauigkeit des Produktionssystems bleibt aus. Darüber hinaus werden wegen den Gegebenheiten der chemischen Prozessindustrie spezielle Anforderungen erfüllt, wohingegen die in Abschnitt 2.3.3 definierten Aspekte teilweise unberücksichtigt bleiben. Die durchgeführte Evaluation vernachlässigt zudem die Rollierung.

Die vorgestellte Auswahl an entwickelten stochastischen Modellen lässt sich unter anderem durch die aktuellen und ausführlichen Reviewbeiträge von [Sah04], [Mul et al.06] sowie [IL09] ergänzen. Die in diesen Beiträgen kurz erläuterten Verfahren stammen methodisch aus unterschiedlichsten Bereichen. Dennoch ist festzustellen, dass der überwiegende Teil der Literatur von bekannten Bedarfen ausgeht. Für diesen Fall existiert eine Vielzahl von praxisnahen Modellen zur Problemlösung. Im Bereich stochastischer Formulierungen wird häufig die taktische, teilweise die strategische Ebene, aber nur selten die operationale Planungsebene betrachtet [AEO05, S.218]. Durch die angeführten stochastischen Modelle wird deutlich, dass im Allgemeinen lediglich elementare Aspekte der Planungsaufgabe erfüllt werden, jedoch keinesfalls die in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Anforderungen vollständig Berücksichtigung finden.

4 Zu leistende Arbeit

An dieser Stelle wird die Herleitung der in Kapitel 5 zu betrachtenden konzeptionellen Aufgaben geleistet. Dazu erfolgt eine Bewertung der in Kapitel 3 vorgestellten Beiträge hinsichtlich der Anforderungen aus Abschnitt 2.3 an die gewinnmaximierende Steuerung der Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen bei gegebenen Elementarfaktoren und begrenzter Bedarfsanmeldung. Die Umsetzung dieser Anforderungen bedarf eines proaktiven Vorgehens, sodass zunächst die Bedarfsentwicklung analysiert und die situationsbedingte Unsicherheit abgebildet werden muss. Die erzielten Ergebnisse sind im Rahmen eines Optimierungsmodells als Formalisierung des Planungsproblems geeignet zu berücksichtigen. Abschließend ist durch Kopplung beider Komponenten die Steuerung der Entscheidungsgrößen in einem zeitlich offenen Entscheidungsfeld zu realisieren. Neben der Identifikation grundlegend geeignete Verfahren zur Lösung einzelner Aspekte der genannten Teilprobleme wird in den nachfolgenden Abschnitten verdeutlicht, welcher darüber hinaus gehende Beitrag zu erbringen ist.

4.1 Entwicklung des Szenariogenerators zur situationsbedingten Abbildung der Bedarfsunsicherheit

Die in Abschnitt 3.1.1 und 3.1.2 vorgestellten Verfahren sind zur Datenaufbereitung im Sinne der Beseitigung von Fehlwerten, Ausreißern, Sonderereignisse und langfristigen Grundkomponenten der Bestellreihen auf Kunden-/ Erzeugnisebene hinreichend geeignet, sodass jene Aspekte von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden. Zur Extraktion von Mustern kann grundsätzlich das in Abschnitt 3.1.3 beschriebene Konzept des Motif Mining verwendet werden. Es bedarf allerdings der Erweiterung des Verfahrens, sodass sowohl verbrauchsorientierte als auch bedarfsorientierte Muster unterschiedlicher Länge ermittelt werden können. In letzterem Fall ist neben der Mengen- auch die Termindimension zu berücksichtigen, ohne eine Verrechnung durchzuführen. Ergänzend ist ein Vorgehen zur Definition des Parameters R zu entwickeln, sodass der Erkennungsprozess auch bei nicht identischen (u. U. wenigen) Musterinstanzen ermöglicht wird. Zur situationsbedingten Bewertung der Bedarfsunsicherheit kann das durch Abbildung 11 eingeführte Modell eines hybriden Vorhersagesystems verwendet werden. Die einzelnen Komponenten sind jedoch problemspezifisch auszugestalten um den in Abschnitt 2.3.2 definierten Anforderungen gerecht zu werden. Dies umfasst insbesondere die Integration der ermittelten Muster als Zusatzinformation, die Bestimmung empirischer Prognosefehlerverteilungen, die Klassifikation der Bedarfssituation zum

Planungszeitpunkt mit der vorhandenen Informationsgrundlage sowie die zielgerichtete Ableitung einzelner Bedarfsszenarien. In der Literatur konnte kein Beitrag gefunden werden, der diese detaillierte Art der Abbildung von Bedarfsunsicherheit leistet.

4.2 Entwicklung des mathematischen Planungsmodells als Steuerungsgrundlage

Das in Abschnitt 3.3.1 vorgestellte Konzept der Lagerhaltungspolitiken und der darauf aufbauenden Verfahren wurde hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit des Produktionsablaufs als unzureichend identifiziert. Publierte Modelle der Produktionsablaufplanung unterstellen entweder bekannte Bedarfe oder vernachlässigen mehrfach relevante Anforderungen aus Abschnitt 2.3.3. Das beschriebene Modell des GLSP bildet jedoch eine geeignete Basis zur Entwicklung eines neuen Modells, welches alle geforderten Aspekte integriert. Zur Komplexitätsbewältigung ist der Planungshorizont vor dem Hintergrund der rollierenden Planung in drei Teilhorizonte mit abnehmendem Detaillierungsgrad zu gliedern, was als Erweiterung der Grundidee von Cui (vgl. Abschnitt 3.3.2) gesehen werden kann. Die über die Standardformulierung hinausgehenden Anforderungen können je Teilhorizont stellenweise durch Übertragung, Erweiterung und Kombination von praxisnahen Formulierungen alternativer Modellklassen realisiert werden. Die Sicherstellung der effizienten Lösung des Planungsmodells erfolgt in Form einer Relax & Fix Heuristik, deren Leistungsfähigkeit bereits gezeigt wurde. Aufgrund zahlreicher Erweiterungen und der damit verbundenen Einführung von Binärvariablen bedarf es allerdings einer problemspezifischen Anpassung des Separationsprozesses.

4.3 Integration von Planungsmodell und Szenariogenerator in einen Steuerungsprozess

Das Konzept der rollierenden Planung dient als Grundlage zur Steuerung der Entscheidungsgrößen. In diesem Zusammenhang sind die sequenziellen Planungszyklen im Hinblick auf die beiden entwickelten Komponenten geeignet zu koppeln. Die Maßnahmen betreffen jeweils die Feststellung des gültigen Startzustands (bezüglich der Rüst-, Wartungs-, Bestands- und Fehlmengensituation), die Ermittlung der kundenseitig angemeldeten Bedarfe je Teilhorizont sowie interne Aspekte des Entscheidungsproblems. Letztere resultieren direkt aus der konzeptionellen Umsetzung der definierten Anforderungen. Darüber hinaus ist zu gewährleisten, dass die Informationsgrundlage ein ggf. verändertes Bestellverhalten im Zeitverlauf adaptiert.

5 Konzeption

In diesem Kapitel erfolgt die detaillierte Beschreibung des Verfahrens zur Problemlösung. Der Aufbau entspricht der Reihenfolge der zuvor identifizierten Aufgaben.

5.1 Entwicklung des Szenariogenerators zur situationsbedingten Abbildung der Bedarfsunsicherheit

Zur Berechnung der situationsbedingten Bedarfsunsicherheit sind die durch Abbildung 12 dargestellten Teilschritte durchzuführen.

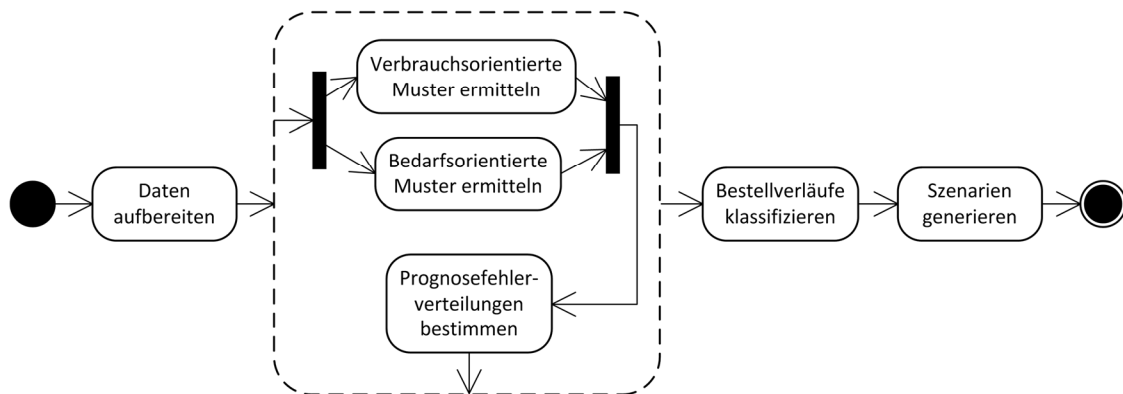


Abbildung 12: Ablauf der situationsbedingten Abbildung von Bedarfsunsicherheit

Die Aufbereitung der vorhandenen Bestellinformationen (Abschnitt 5.1.1) beinhaltet alle nötigen Maßnahmen bzgl. der vorhanden Datenbasis um diese in den Zustand zu überführen, dass verbrauchs- und bedarfsorientierte Muster ermittelt (Abschnitt 5.1.2) bzw. Prognosefehlerverteilungen bestimmt (Abschnitt 5.1.3) werden können. Die nachgelagerte Klassifikation auf Bestellverlaufesebene (Abschnitt 5.1.4) dient der situativen Bewertung künftiger Realisierungen. Abschließend erfolgt auf Basis der Klassifikationsergebnisse die Ableitung potenzieller Bedarfsszenarien (Abschnitt 5.1.5).

5.1.1 Aufbereitung der vorhandenen Bestellinformationen

Die Bestellinformationen umfassen alle vorhandenen historischen sowie aktuellen Bestellungen von dessen erster angemeldeter Bestellmenge und zugehörigem Liefertermin bis zu den jeweils aktuellen oder bereits fixierten Werten (vgl. Abschnitt 2.1.1). Es wird davon ausgegangen, dass Fehlwerte, Ausreißer und quantifizierbare Sonderereignisse

nicht vorhanden sind bzw. durch die in Abschnitt 3.1.1 genannten Methoden weitestgehend beseitigt wurden. Die Aufbereitung beschränkt sich damit auf die Generierung je einer Datenbasis zur Ermittlung von verbrauchs- sowie bedarfsorientierten Mustern, Prognosefehlerverteilungen und der nachgelagerten Klassifikation. Vor diesem Hintergrund sind zunächst die Längen der relevanten Teilplanungshorizonte zu definieren. Horizont eins folgt im Allgemeinen aus der minimalen eingefrorenen Zone aller Rahmenvertragsvereinbarungen, kann jedoch bei entsprechendem Erfahrungswissen mit Parameter n^{H1} auf den Bereich⁴⁹ quasi sicherer Informationen ausgeweitet werden. Der zweite Teilhorizont entspricht dem Minimum aller tagbasierten Bestellzonen der Verträge und ist durch Parameter n^{H2} weiter einschränkbar.

Die notwendige Datengrundlage zur verbrauchsorientierten Mustersuche lässt sich direkt durch die ausschließliche Betrachtung aller fixierten Bestellmengen und –termine je Kunde k und Erzeugnis e bestimmen. Um äquidistante Zeitreihen zu erhalten ist für jedes Datum ohne Bestellmenge an der entsprechenden Stelle ein Nullwert einzufügen, sodass fortan auf die Berücksichtigung der Termine verzichtet werden kann. Die resultierenden Zeitreihen $ZR_{k,e}^{VOM}$ sind anschließend (in Richtung Vergangenheit) soweit wie möglich um gegebenenfalls vorhandene längerfristige, strukturelle Trend-, Saison- und Konjunkturkomponenten zu bereinigen, damit diese das Ergebnis der lokalen Mustersuche nicht verfälschen oder gar verhindern. Aufgrund der in Abschnitt 3.1.2 genannten Verfahren wird auf diesen Aspekt nicht weiter eingegangen.

Die bedarfsorientierte Datenbasis zur Analyse des Abrufverhaltens beruht auf der Aufspaltung der Bestellinformationen in je eine Zeitreihe bzgl. der Mengen- sowie Terminwerte jeder bereits fixierten Bestellung eines Kunden k und Erzeugnis e . Eine Bestellung b wird genau dann als unveränderlich angesehen, wenn deren Liefertermin ausgehend vom Planungszeitpunkt in der Vergangenheit liegt oder eine Periode aus Teilhorizont eins betrifft. Zur Erstellung der Prognosefehlerverteilungen liegen somit die abgeschlossenen Zeitreihen $ZR_{k,e,b}^{BOM}$ und $ZR_{k,e,b}^{BOT}$ vor. Absolute Mengen- oder Terminangaben erschweren jedoch das Auffinden der Muster, da üblicherweise Anmeldungen in unterschiedlicher Höhe vorliegen und ggf. vorhandene Regelmäßigkeiten von diesen abhängig sind. Daher wird jeder aktualisierte Wert einer historischen, tagesbezogenen Bestellung auf dessen initiale Anmeldung bezogen. Im Fall der Bestellmengen geschieht dies anteilig, für Bestelltermine jedoch relativ, da der Initialtermin keine verwendbare anteilige Bezugsgröße darstellt. Im letzten Schritt werden die so bestimmten Mengen- und Terminreihen je (k, e) -Tupel konkateniert, sodass die Zeitreihen $ZR_{k,e}^{BOM}$,

⁴⁹ Die Parameter n^{H1} , n^{H2} und n^{H3} (vgl. Abschnitt 5.2.1) bezeichnen jeweils den Index der letzten Periode des betreffenden Teilhorizonts, wobei die Indizierung ausgehend von null inkrementiert wird.

$ZR_{k,e}^{BoT}$ resultieren, in denen typische Bestellverläufe zu beliebigen Zeitpunkten und in beliebiger Länge gefunden werden können. Zur weiteren Verarbeitung sind zusätzlich die Indizes der Konkatinationsstellen je Zeitreihe durch Menge $KS_{k,e}^{Bo}$ zu speichern.

Um im Rahmen der Klassifikation die gefundenen Muster zuordnen zu können, werden die jeweiligen aktuellen bedarfs- und verbrauchsorientierten Bestellentwicklungen benötigt. Letztere sind bereits durch $ZR_{k,e}^{VoM}$ gegeben. Im bedarfsorientierten Fall erfolgt die Aufbereitung aller Bestellungen, deren Liefertermin mindestens $n^{H1} + 1$ jedoch nicht weiter als $n^{H2} + 1$ Tage in der Zukunft liegt. Das Vorgehen ist analog zu den historischen, tagesbezogenen Zeitreihen, allerdings ohne Konkatination, sodass als Ergebnis die unvollständigen Verläufe $uZR_{k,e,b}^{rBoM}$ und $uZR_{k,e,b}^{rBoT}$ vorliegen. Um die Bestelländerungen wieder auf absolute Mengen und Termine zurückführen zu können werden außerdem die nicht relativierten Zeitreihen $uZR_{k,e,b}^{aBoM}$ und $uZR_{k,e,b}^{aBoT}$ bereitgestellt.

5.1.2 Ermittlung bedarfs- und verbrauchsorientierter Muster

Die Ermittlung der bedarfs- und verbrauchsorientierten Muster in den jeweiligen Zeitreihen greift methodisch teilweise auf das in Abschnitt 3.1.3 vorgestellte Verfahren des Motif Mining zurück. Der Algorithmus wird jedoch dahingehend erweitert, dass nicht nur das signifikanteste Motif (1-Motif), sondern alle vorhandenen k-Motifs bestimmt werden, ohne die Laufzeit wesentlich zu verlängern. Die Motivation folgt im Sinne der gewinnmaximierenden Steuerung aus der Relevanz auch weniger häufig auftretender Bestellregelmäßigkeiten. Tabelle 7 zeigt das Ergebnis der Modifikationen im Zusammenhang, wobei sich die nachfolgenden Erläuterungen auf die eingeführten Erweiterungen beschränken. Zunächst werden Container zur Speicherung der gefundenen Motifs beziehungsweise der Motifzentren pos_k_Motif und den zugehörigen Treffern $posMotifTreffer$ angelegt. Die Zeilen 8-19 beschreiben die Berechnung aller nicht trivialen Treffer für jede mögliche Teilzeitreihe, wobei die Ergebnisse in Form der jeweiligen Anzahl und den entsprechenden Positionen durch $anzahlNTT$, respektive $postTreffer$ nachgehalten werden. Funktion $nicht_trivialer_treffer$ geht in der Umsetzung über Formel (3.8) hinaus, indem bei beliebig aber fixem i und mehreren aufeinanderfolgenden Treffern bezüglich j nur jener mit minimaler Distanz gezählt wird. Anschließend sind die Startindizes nach Anzahl der Treffer absteigend zu sortieren. Die Schleife in Zeile 23 führt zur sukzessiven Betrachtung aller Elemente der sortierten Indexmenge und den jeweils zugehörigen Treffern. Ein Motif existiert immer dann, wenn neben der bereits bekannten Bedingung der Mindestdistanz auch die minimale Menge an Treffern n^{min} sowie die minimale Verschiebung eingehalten werden. Die feste Vorgabe der minimalen Anzahl zugeordneter Teilzeitreihen hilft die Entstehung zufallsbe-

dingter Muster zu vermeiden⁵⁰. Zusätzlich wird für alle Teilzeitreihen des k-Motif gefordert, dass deren Startindex eine absolute Abweichung von mindestens $\left\lceil \frac{ml}{2} \right\rceil$ Positionen zu allen Teilzeitreihen der k-1 Motifs aufweist, sodass ein relevanter Informationszugewinn sichergestellt ist. Nach Terminierung des Algorithmus liegen die Positionen der Motifzentren und -treffer in den eingangs definierten Containern vor.

Algorithmus: Berechne_k_Motifs(ZR, ml, R)	
1	<i>//Initialisierung</i>
2	<i>pos_k_Motif := { };</i>
3	<i>posMotifTreffer := { };</i>
4	<i>anzahlNTT := [];</i>
5	<i>posTreffer := [];</i>
6	
7	<i>//Bestimmen der nicht trivialen Treffer</i>
8	for <i>i = 1 to laenge(ZR) - ml + 1</i>
9	<i>anzahl = 0;</i>
10	<i>zeiger = { };</i>
11	for <i>j = 1 to laenge(ZR) - ml + 1</i>
12	if <i>nicht_trivialer_treffer(ZR_[i:i+ml-1], ZR_[j:j+ml-1], R)</i>
13	<i>anzahl = anzahl + 1;</i>
14	<i>zeiger.add(j);</i>
15	end;
16	end;
17	<i>anzahlNTT[i] = {i, anzahl};</i>
18	<i>posTreffer[i] = zeiger;</i>
19	end;
20	
21	<i>//Berechnen der k_Motifs</i>
22	<i>Sortiere(anzahlNTT, "absteigend", '2');</i>
23	for <i>i = 1 to laenge(ZR) - ml + 1</i>
24	<i>idx = anzahlNTT[i].get(1);</i>

⁵⁰ Alternativ kann die Referenzgröße durch einen entsprechend parametrisierten Zufallsprozess geschätzt werden (vgl. [Den05]). Da im unterstellten Anwendungsfall jedoch von vergleichsweise kleinem Stützzeitraum (begrenzter Produktlebenszyklus bei tagbasierter Informationsdichte) und moderater Streuung (ansonsten würde bevorzugt auf die in Abschnitt 5.1.3 definierten Prognosefehlerverteilungen zurückgegriffen) auszugehen ist, fällt die Auswirkung dieses Aspekt auf die Abbildung der Bedarfsunsicherheit eher gering aus, sodass die vorgeschlagene Berücksichtigung ausreichend erscheint.

```

25     if anzahlNTT[i].get(2)  $\geq n^{\min}$ 
26         and minDistanz(ZR[idx:idx+ml-1], pos_k_Motif) > 2R
27         and minVerschiebung(idx, pos_k_Motif, posTreffer)
28             pos_k_Motif.add(idx);
29             posMotifTreffer.add(posTreffer[idx]);
30     end;
31 end;

```

Tabelle 7: Der k -Motif Brute Force Algorithmus

Neben der Erweiterung des Algorithmus ist ein heuristisches Vorgehen zur Wahl des Parameters R zu entwickeln. Im Sinne qualitativer Ergebnisse wird das gegebenenfalls vorhandene problemspezifische Wissen der prozessverantwortlichen Mitarbeiter soweit wie möglich berücksichtigt. Somit sind zunächst Befragungen durchzuführen, um bekannte Muster und die zugehörigen Teilzeitreihen zu identifizieren. Anschließend kann der gesuchte Parameter unter Verwendung der definierten Distanzfunktion so berechnet werden, dass gerade noch alle Musterinstanzen als zusammengehörig gelten. Häufig sind jedoch im Vorhinein nicht mal die Anzahl der Muster, deren Auftrittshäufigkeit, die unterschiedlichen Längen oder die Beschaffenheit der vorliegenden Daten bzgl. zufälliger Schwankungen in Abhängigkeit der Kunden und Erzeugnisse bekannt. Für diesen Fall kann R ausschließlich durch statistische Auswertungen geschätzt werden. Das hierzu entworfene Verfahren basiert auf der multiplen Ausführung des k -Motif Algorithmus mit streng monoton wachsendem R und der Analyse der resultierenden Anzahl an gefundenen Motifs, nicht trivialen Treffern und dem Quotienten der beiden Größen. Werden diese bzgl. R in je einem Diagramm abgetragen, entstehen ggf. charakteristische Verläufe (fortan Kennlinien). Die zugrunde liegende Annahme ist, dass tatsächlich vorhandene Muster im Vergleich zu Zufallsdaten (bei der richtigen Wahl des Parameters) zu einer deutlich höheren Anzahl an Treffern führen. Abbildung 13 stellt die erwarteten, idealisierten Kennlinien in den auftretenden vier Phasen⁵¹ der typischen Entwicklung für den Fall einer musterenthaltenden und einer zufälligen Datenbasis detailliert gegenüber.

⁵¹ Es existiert auch eine fünfte Phase in der k_2, k_3 gegen Null gehen, da kaum noch nicht triviale Treffer ermittelt werden können. Eine vorzeitige Abbruchbedingung ist jedoch durch k_1 gegeben (Motifabstand > Trefferkriterium), sodass diese Phase für die Herleitung von R irrelevant ist und deshalb nicht dargestellt wird.

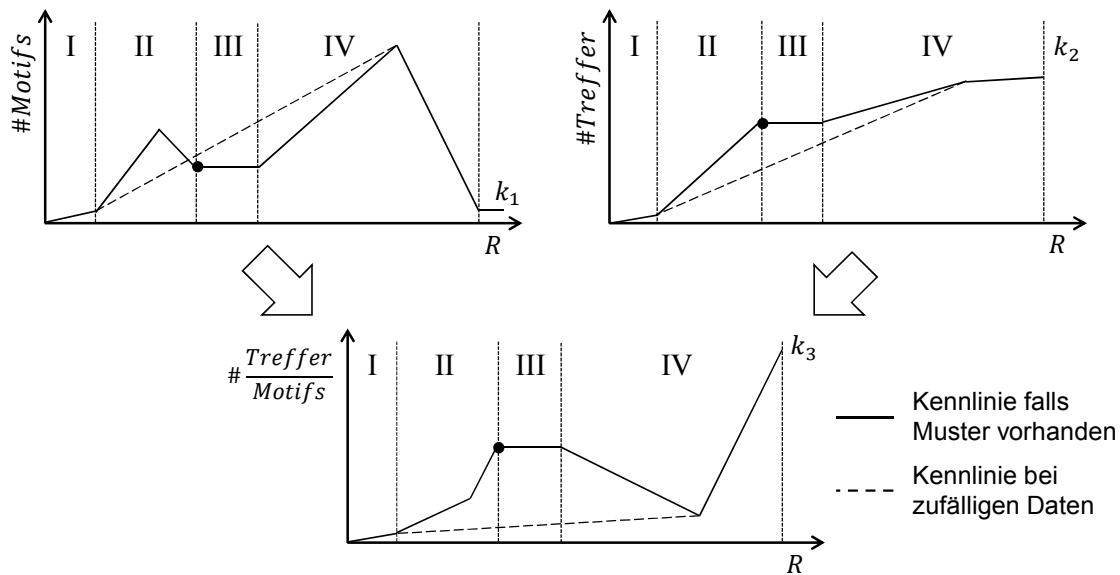


Abbildung 13: Idealisierte Kennlinien zur Bestimmung von R

Die erste Phase ist dadurch gekennzeichnet, dass R zu klein gewählt ist um die Instanzen der vorhandenen Muster als solche zu erkennen. Folglich werden höchstens Zufallstreffer erzielt, sodass die Werte aller Kennlinien zu vernachlässigen sind. Zu Beginn der zweiten Phase erreicht der Parameterwert ein Niveau, für welches die Instanzen mit geringster Entfernung je Muster als Treffer gewertet werden. Damit steigt ggf. die Anzahl der Motifs nahezu identisch mit der Anzahl der Treffer. Nachfolgend behält Letztere diesen Verlauf relativ kontinuierlich bei bis ein Großteil der Musterinstanzen gefunden worden sind, wohingegen die Anzahl der Muster tendenziell zurückgeht, da R inzwischen ausreichend groß ist um die Instanzen je Muster vom Motifzentrum aus als Treffer zu erkennen. Daraus resultiert ein Anstieg der dritten Kennlinie bis zum markierten lokalen Hochpunkt. Phase drei ist in jedem Diagramm durch einen konstanten Verlauf gekennzeichnet, da alle Musterinstanzen gefunden wurden und lediglich zu vernachlässigende Zufallstreffer auftreten können. Zu Beginn der abschließenden Phase hat R schließlich eine Größenordnung erreicht, für die Zufallstreffer von Bedeutung werden, da ihre Häufigkeit zunimmt. Die Anzahl der Treffer steigt kontinuierlich, relativ jedoch geringer als die der Motifs, was eine deutliche Abnahme der dritten Kennlinie verursacht. Dies setzt sich bis zu dem Punkt fort, an dem der geforderte Mindestabstand von $2R$ zwischen Motifs dazu führt, dass bisher gültige Motifzentren aus der Betrachtung ausgeschlossen werden, deren Treffer wegen des bereits sehr großen R jedoch häufig anderen Motifs zugeordnet werden können. Ab einem gewissen Parameterwert existiert daher nur noch ein Motif mit einem Großteil der maximal möglichen Anzahl an Treffern und einem daraus resultierendem Hochpunkt der Kennlinie bzgl. durchschnitt-

licher Anzahl Treffer je Motif, sodass diese Situation als Abbruchbedingung genutzt wird. Vergleicht man die beschriebenen Verläufe mit den entsprechenden Kennlinien bei zufälligen Daten fällt auf, dass diese im relevanten Bereich der Phasen zwei bis vier einen relativ konstant steigenden Verlauf zeigen und sich damit deutlich unterscheiden. Die Verläufe k_1 bis k_3 treten jedoch bei Datenbasen mit Mustern unterschiedlicher Länge aufgrund frühzeitiger Zufallstreffer⁵² nicht in dieser idealisierten Form auf. Darüber hinaus verschieben sich die Phasen der Musterkennlinien mit zunehmender Streuung in den Bereich, der von Zufallstreffern dominiert wird, sodass beliebig signifikante Verläufe resultieren können. Die Festsetzung von R beruht daher auf den folgenden Regeln mit absteigender Priorität:

1. **Kennlinie k_3 feststellbar:** Ist dieser Verlauf zu ermitteln, kommt ihm die höchste Aussagekraft zu, da er aus der Kombination von Kennlinie eins und zwei resultiert. R ergibt sich durch den Parameterwert, der dem ersten Punkt aus Phase drei zugeordnet ist.
2. **Kennlinie k_2 feststellbar:** Sind Muster unterschiedlicher Länge in der Datenbasis enthalten, ist Regel eins häufig nicht anwendbar, da die Motifanzahl durch Zufallstreffer vorzeitig stark ansteigt. Die Anzahl der Treffer verhält sich jedoch annähernd wie erwartet, da die Zufallstreffer lediglich einen geringen Anteil der Gesamttreffer ausmachen. Infolge ergibt sich R durch den Parameterwert, der dem ersten Punkt aus Phase drei zugeordnet ist.
3. **Kennlinie k_1 feststellbar:** Auch wenn Regel zwei nicht anwendbar ist, kann der Kennlinienverlauf gefundener Motifs signifikant ausgeprägt sein. Die Auswahlregel basiert dann auf dem Prinzip der höchsten „Lebensdauer“ und R resultiert wiederum aus dem Wert, der dem ersten Punkt von Phase drei zugeordnet ist.
4. **Kein signifikanter Kennlinienverlauf:** Es gilt $R \approx 0$, wobei es auch in diesem Fall weiterhin möglich ist Muster zu finden und diese zur Steuerung zu nutzen.

Auf Grundlage der vorgestellten Erweiterungen kann der Motif Mining Algorithmus zur Ermittlung der Muster problemspezifisch eingesetzt werden. Der Ablauf des verbrauchs- und bedarfsorientierten Erkennungsprozesses ähnelt sich jedoch recht stark, weshalb mit der Darstellung der weniger komplexen verbrauchsorientierten Variante begonnen wird und sich die Erläuterung der Bedarfsorientierten nachfolgend auf die Unterschiede bzw. die zusätzlichen Aspekte beschränkt. Zur Berechnung der Treffer ist zunächst eine Distanzfunktion d zu definieren. Auf Basis der euklidischen Distanz und der Funktion $elem$ ergibt sich diese für zwei Teilzeitreihen tzr der Länge ml durch:

⁵² Für veranschaulichende Details bzgl. der Problematik des Motif Mining bei Datenbasen mit unterschiedlicher Musterlänge sei an [TL08, S.667–668] verwiesen.

$$d(tzr_1, tzr_2) = \sqrt{\sum_{i=1 \dots ml} (elem(tzr_1, i) - elem(tzr_2, i))^2} \quad (5.1)$$

Muster dienen ausschließlich dem Zweck der Bedarfsbestimmung im Teilplanungshorizont zwei. Die Maximallänge ml^{max} der zu betrachtenden Muster kann daher kundenübergreifend durch $2 * (n^{H2} - n^{H1})$ limitiert werden (maximaler Prognosezeitraum und identische Klassifikationsspanne). Als minimale Musterlänge wird der Parameter ml^{min} definiert, welcher den Wert von fünf aufeinanderfolgenden Datenpunkten (Werkzeuge einer Woche) nicht unterschreiten sollte. Einen Überblick über den Ablauf der verbrauchsorientierten Mustersuche liefert Abbildung 14.

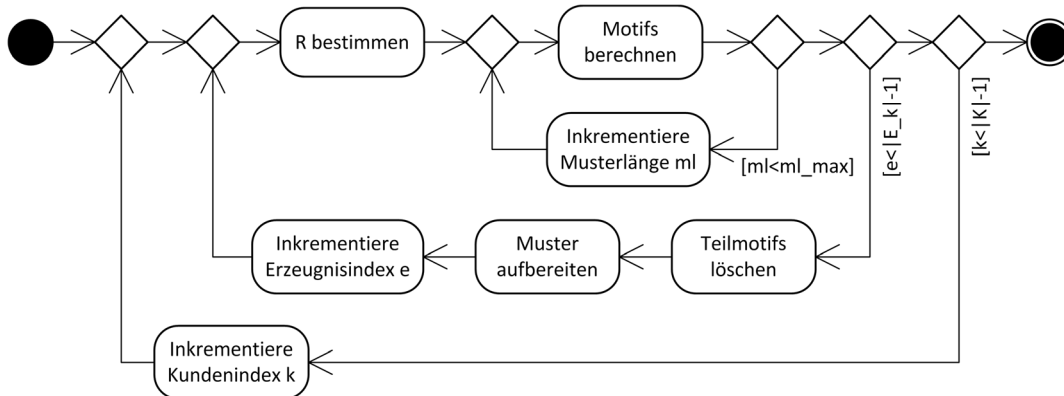


Abbildung 14: Ablauf der verbrauchsorientierten Mustererkennung

Ausgehend von Kunde k mit Index null sowie dem von k bezogenen Erzeugnis e mit Index null wird zunächst der Parameter $R_{k,e}$ für diese Datenbasis und in Abhängigkeit einer beliebigen Musterlänge ml^* festgelegt. Liegen hierzu Instanzen eines Musters als Erfahrungswissen vor, ist die Dreiecksmatrix der Entfernungen zwischen allen Elementen zu berechnen. Der gesuchte Wert entspricht der größten Distanz des Elements, welches die kleinste Maximaldistanz zu allen Anderen aufweist. Alternativ wird auf die statistische Herleitung zurückgegriffen. Die Verwendung einer geringen Fensterbreite wirkt sich dabei positiv auf den Fehler der Heuristik aus, da alle Muster größerer Länge Berücksichtigung finden und daher eine tendenziell große Anzahl an Treffern erzielt wird, sodass Zufallstreffer vergleichsweise wenig Einfluss nehmen. Anschließend wird der k -Motif Algorithmus ausgehend von ml^{min} iterativ mit ganzzahlig aufsteigender Musterlänge ml sowie entsprechend angepasstem $R_{k,e,ml}$ ausgeführt und die resultierenden Motifs gespeichert. Dieser Vorgang wiederholt sich bis die maximale Musterlänge erreicht ist. Es wird dabei unterstellt, dass die Streuung der Musterinstanzen für eine feste Kombination aus Kunde und Erzeugnis im Erwartungswert proportional zur

Musterlänge steigt. Daher kann die Inter- sowie Extrapolation durch die Berechnung der quadratischen Abweichung pro Längeneinheit Δ^2 bezüglich d erfolgen. Demnach gilt $\Delta^2 = \frac{R^2}{ml^*}$, sodass durch Einsetzen in $R = \sqrt{ml} * \Delta^2$ der Parameterwert für beliebige Musterlängen berechenbar ist⁵³. Bei dem iterativen Vorgang der Suche werden im Allgemeinen für ein Muster der Länge ml auch (ggf. mehrere) Motifs der Längen $ml^{min}, \dots, ml, \dots, ml + x$ gefunden. Da es sich bei diesen Motifs nicht um Muster handelt sind sie auf Kunden-/ Erzeugnisebene zu entfernen, um die nachgelagerte Planung nicht negativ zu beeinflussen. Im ersten Schritt werden für Motifs mit Länge ml^{min} Konfliktmengen gebildet, in die jeweils alle größeren Objekte eingehen, deren Zentrum ein oder mehrere Teilzeitreihen des Minimalmotifs in Gänze überspannt. Anschließend sind diejenigen Konfliktmengen zusammenzufassen, nachgelagert bzgl. Motiflänge zu gruppieren und aufsteigend zu sortieren, welche dasselbe Element mit maximaler Länge beinhalten. Je Konflikt werden die (gruppenbezogenen) Positionsindizes solange absteigend durchlaufen, wie die maximale Trefferanzahl eines Motifs der aktuellen Position p im Vergleich zum Wert der Vorherigen erheblich (mehr als 20 %) zunimmt. Ausschließlich das Element mit größter Anzahl an Treffern hinsichtlich $p + 1$ wird jeweils als Muster übernommen. Der abschließende Schritt einer Iteration der verbrauchsorientierten Mustererkennung betrifft deren Bereitstellung zur weiteren Verarbeitung. Da weder eine exakte Betrachtung einzelner Instanzen, noch die Aggregation zu einer Durchschnittsinstanz je gefundenem Muster zweckmäßig erscheint, werden alle Teilzeitreihen eines Musters pro Periode in Form einer empirischen Häufigkeitsverteilung abgebildet (vgl. Abbildung 15).

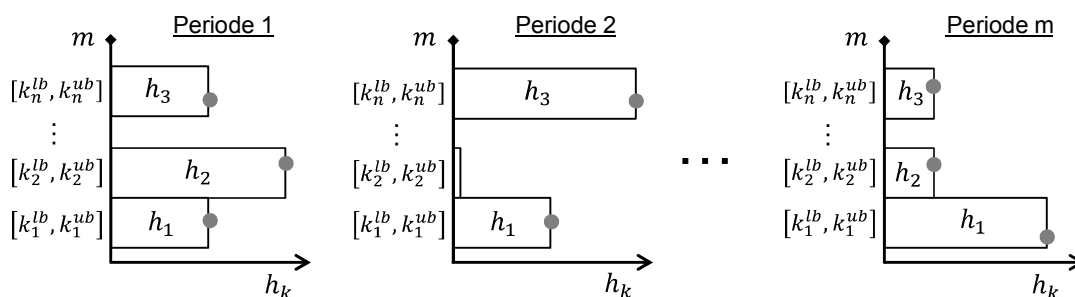


Abbildung 15: Beispielhafte Abbildung eines Musters durch empirische Häufigkeitsverteilungen

⁵³ Aus Aufwandsgründen kann die manuelle Bestimmung von R auf die Elemente vorab gebildeter Erzeugnisgruppen beschränkt werden. Dazu bietet sich beispielsweise die ABC/XYZ-Klassifikation an (vgl. [Arn08, S.84–94]). Wird angenommen, dass die Streuung maßgeblich aus dem durchschnittlichen Zeitreihenniveau des betreffenden Kunden und Erzeugnis resultiert, lässt sich das Ergebnis der Repräsentanten auf alle weiteren bezogenen Erzeugnisse desselben Kunden umrechnen. Eine kundenübergreifende Verrechnung ist vorab (zumindest stichprobenhaft) manuell zu überprüfen.

Jede Verteilung enthält eine konstante Anzahl von Klassen (Parameter n^{HVK}), die den Bereich von der minimalen bis zur maximalen Periodennachfragemenge in gleich große Bereiche einteilen. Das Vorgehen reduziert die negativen Auswirkungen der Betrachtung einer Stichprobe, indem auch unbeobachtete Mengen als potenzielle künftige Ausprägung abgebildet werden. In diesem Zusammenhang wird auch die Ursache der Gewichtung deutlich, da sie aus dem Anteil der Musterinstanzen der betrachteten Klasse an der Menge der Instanzen aller Klassen resultiert und somit ein Indikator des Informationsgehalts ist. Um nachfolgende Berechnungen mit geringem Aufwand und dennoch vergleichsweise hoher Genauigkeit durchführen zu können werden für jede Verteilung die Klassenschwerpunkte bestimmt, welche durch das arithmetische Mittel aller Werte der betreffenden Klasse definiert sind. Der Erkennungsprozess aller weiteren Kunden und deren bezogenen Erzeugnisse verläuft identisch, sodass am Ende dieses Schrittes eine Menge von Mustern $M_{k,e}^{VO}$ vorliegt, wobei jedes Element durch eine Menge von zeitlich geordneten empirischen Häufigkeitsverteilungen beschrieben wird.

Im Fall der bedarfsorientierten Muster entsprechen die Distanzfunktion sowie die Minimallänge den bereits vorgestellten verbrauchsorientierten Pendanten. Die maximale Musterlänge ist indirekt durch die Elementanzahl der Bestellreihen determiniert. Unterschiede im Ablauf resultieren im Wesentlichen aus der Datenbasis, die neben Mengenänderungen auch Terminänderungen auf Kunden-/ Erzeugnis-/ Bestellebene abbildet. Der Parameter R wird infolge dessen auf Grundlage der Zeitreihen beider Dimensionen bestimmt. Falls einzelne Instanzen eines Musters als Erfahrungswissen vorliegen, werden gegebenenfalls unterschiedliche Elemente mit minimaler Maximaldistanz berechnet. Daher sind die Identifikation der nächstgrößeren Maximaldistanz und das Speichern der zwei zugehörigen Elemente solange fortzusetzen, bis ein für beide Dimensionen gültiges Zentrum ermittelt wurde. Bei der statistischen Herleitung ohne Vorabinformationen ist zu beachten, dass die Zeitreihen je Kunde und Erzeugnis durch Konkatination der Teilzeitreihen je Bestellung entstanden sind. Um sicherzustellen, dass keine Muster gefunden werden können für die einzelne Instanzen zwei unterschiedliche Teilzeitreihen betreffen, sind die Schnittstellen beim Motif Mining zu überspringen. Der k-Motif Algorithmus ist daher in Zeile 11 derart anzupassen, dass die Auswertung der nicht trivialen Treffer ausgespart wird, falls das durch $[i, \dots, i + ml - 1]$ bzw. $[j, \dots, j + ml - 1]$ aufgespannte linksseitig offene Indexintervall eine der zur aktuellen Zeitreihe gespeicherten Konkatinationsstellen $KS_{k,e}^{BO}$ beinhaltet. Nachdem R durch diesen modifizierten Algorithmus oder unter Ausnutzung von Erfahrungswissen bestimmt wurde, beginnt die Suche nach bedarfsorientierten Regelmäßigkeiten. Da die beiden Dimensionen der Zeit und der Mengen nicht in einem Distanzmaß verrechnet werden können,

erfolgt deren Betrachtung getrennt, aber zeitgleich. Abbildung 16 visualisiert dieses Vorgehen.

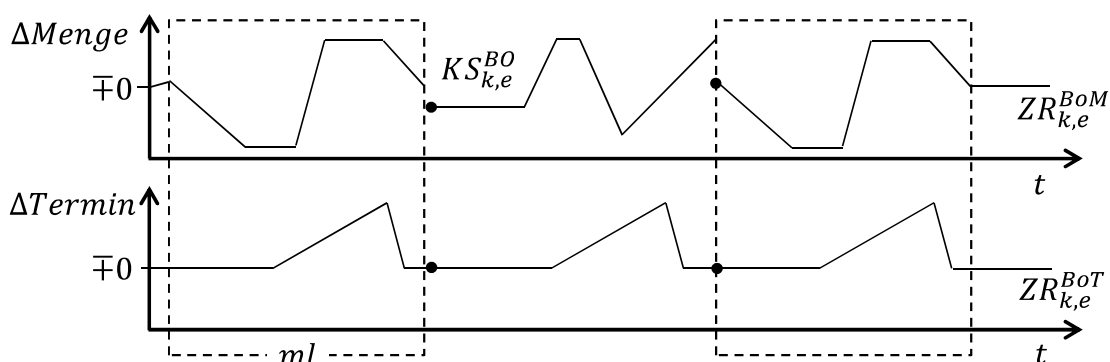


Abbildung 16: Motif Mining im Fall der bedarfsorientierten Zeitreihen

Ein Motif kann demnach nur genau dann vorliegen, wenn die Treffer unter Verwendung des entsprechenden Parameterwerts R in beiden Dimensionen zu gleichen Zeitpunkten auftreten. Der k -Motif Algorithmus wird hierzu in Zeile 12 angepasst, sodass die nachfolgenden konditionalen Anweisungen nur ausgeführt werden, wenn dies durch Funktion *nicht_trivialer_treffer* bzgl. Parameter $ZR_{k,e}^{BoM}$ und $ZR_{k,e}^{BoT}$ angezeigt wird. In deren Implementierung ist zu berücksichtigen, dass die Nichttrivialitätseigenschaft bereits gegeben ist, wenn sie in nur einer Dimension gilt. Die Bedingungen der minimalen Distanz und der minimalen Verschiebung in den Zeilen 26, 27 sind ebenfalls in der Mengen- oder Terminbetrachtung einzuhalten, da beide Reihen derselben zeitlichen Indizierung folgen und bei simultaner Auswertung lediglich ein Muster je Teilzeitreihenverlauf einer Dimension existieren könnte. Darüber hinaus sind die Zentren und Treffer eines Motifs je Dimension zu speichern. Die notwendigen Änderungen sind jedoch rein technisch und offensichtlich, weshalb auf deren Darstellung verzichtet wird. Nachdem die Motifs im Bereich der minimalen und maximalen Länge bestimmt wurden, sind diejenigen zu löschen, welche aufgrund ihrer Beschaffenheit kein Muster repräsentieren. Die Analyse und Auflösung solcher Konfliktobjekte ist durch Verwendung der Mengen- oder Termindimension möglich und folgt damit der Methodik des verbrauchsorientierten Falls. Alle verbleibenden Motifs werden als Muster zur weiteren Verarbeitung in Form empirischer Häufigkeitsverteilungen abgebildet. Der Vorgang entspricht wiederum der verbrauchsorientierten Variante, allerdings mit dem Unterschied, dass jede Verteilung um die Termindimension erweitert wird. Diese bildet aufgetretene Terminverschiebungen durch zusätzliche Klassen je mengenbasierter Klasse ab. Die Termini sind auf Tagesbasis und berücksichtigen daher die feinste Granularität, weshalb die Schwerpunktbildung entfällt. Der Erkennungsprozess aller weite-

ren Kunden und deren bezogenen Erzeugnisse verläuft identisch, sodass am Ende dieses Schrittes eine Menge von Mustern $M_{k,e}^{BO}$ vorliegt, wobei jedes Element durch eine Menge von zeitlich geordneten, zweidimensionalen, empirischen Häufigkeitsverteilungen beschrieben wird.

5.1.3 Bestimmung der empirischen Prognosefehlerverteilungen

Auf Kunden-/ Erzeugnisebene ist für jede angemeldete Bestellung b grundsätzlich eine zur proaktiven Fortschreibung von b verwendbare Datenbasis zur Verfügung zu stellen. Nach Abschnitt 2.2.1 kann allerdings nicht von ausschließlich musterbasiertem Bestellverhalten ausgegangen werden kann, sodass neben dem in Abschnitt 5.1.2 entwickelten Vorgehen eine alternative Grundlage zur Abschätzung der Bedarfsunsicherheit gegeben werden muss. Diese resultiert aus der Betrachtung der historischen Prognosefehler mit verschiedenen Bezugszeitpunkten im Planungshorizont. Anhand von Abbildung 17 soll dieser Ansatz motiviert und im Anschluss erläutert werden.

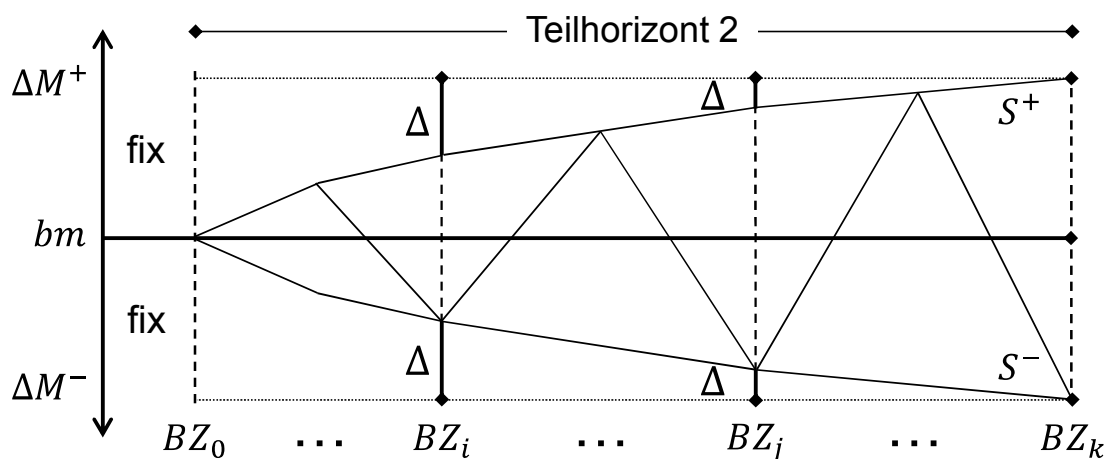


Abbildung 17: Typisches Streuungsverhalten im Zeitverlauf am Beispiel der Mengendimension

Sei bm jeweils die tatsächlich nachgefragte Bestellmenge beliebiger Kundenbestellungen, welche zuvor vielfach im Bereich des zweiten Teilplanungshorizonts aktualisiert wurde. Der Verlauf von S^- , S^+ illustriert das Prinzip des tendenziell abnehmenden Streuungsausmaßes in Richtung Fixierungszeitpunkt. Eine solche ggf. vorhandene Charakteristik lässt sich kundenseitig beispielsweise mit dem Übergang von Prognose- zu Bestelldaten oder durch allgemein erhöhte Planungsanstrengungen im Nahbereich erklä-

ren. Auf Bestellebene ergeben sich daher häufig Verläufe deren Schwankung zunehmend geringer wird, die eine (teilweise) gleichbleibende Grundrichtung aufweisen oder beide Aspekte kombinieren. Werden zur Berechnung einer Prognosefehlerverteilung lediglich die Bestellinformationen des Zeitpunkts BZ_k und der zugehörigen Realisationen zugrunde gelegt, fällt die Streuung der resultierenden Verteilung zur Korrektur angemeldeter Bestellungen unnötig groß aus, da die Entwicklung der Verläufe bis zum aktuellen Bezugszeitpunkt vernachlässigt wurde (vgl. Δ bzgl. BZ_i, BZ_j). Um diese Problematik zu vermeiden und aktuelle Bestellinformationen nicht zu ignorieren, wird jede Verteilung in Abhängigkeit aller Bezugszeitpunkte berechnet, welche in Form der Perioden des zweiten Teilplanungshorizonts gegeben sind. Berücksichtigung finden dabei jedoch lediglich Bestellverlaufsinformationen, welche kein Bestandteil eines bedarfsorientierten Musters sind und die Verteilung daher nicht verfälschen. Die Indizes der Perioden aus Teilhorizont zwei determinieren wegen möglicher Terminänderungen nicht unmittelbar die relevanten Positionsindizes der Bestellverläufe, sodass vorab entsprechende Indexmengen $IM_{k,e,b,bz}^{pos}$ berechnet werden müssen. Vor diesem Hintergrund erfolgt als Zwischenschritt die Generierung von zusätzlichen Zeitreihen $ZR_{k,e,b}^{pFix}$, welche jeweils für alle übermittelten absoluten Kundenwunschtermine einer Bestellung die aus früherer Sicht verbleibende Periodenanzahl bis zu dessen Fixierung angeben. Ausgehend von einer Bestellreihe mit Maximalindex $n = |ZR_{k,e,b}^{BoT}| - 1$ gilt für $0 \leq i \leq n$:

$$elem(ZR_{k,e,b}^{pFix}, i) = n - i + (elem(ZR_{k,e,b}^{BoT}, i) - last(ZR_{k,e,b}^{BoT})) \quad (5.2)$$

Damit folgt $IM_{k,e,b,bz}^{pos}$ aus der Menge der Indizes bezüglich $ZR_{k,e,b}^{pFix}$, deren zugehöriger Wert dem Bezugszeitpunkt bz entspricht. Auf Basis aller Bestellverläufe b (einer Kundenerzeugnisebene) für die eine nicht leere Indexmenge berechenbar ist, werden anschließend die Prognosefehler in Abhängigkeit von bz , hinsichtlich der Mengendimension durch Formel (5.3) und bezüglich der Zeitdimension durch Formel (5.4) ermittelt.

$$\frac{last(ZR_{k,e,b}^{BoM})}{elem(ZR_{k,e,b}^{BoM}, idx)} \quad \forall idx \in IM_{k,e,b,bz}^{pos} \quad (5.3)$$

$$last(ZR_{k,e,b}^{BoT}) - elem(ZR_{k,e,b}^{BoT}, idx) \quad \forall idx \in IM_{k,e,b,bz}^{pos} \quad (5.4)$$

Abschließend wird das Intervall aus minimalem und maximalem mengenbezogenem Wert je aufgetretener Terminabweichung in je n^{PFK} gleich große Bereiche eingeteilt,

sodass alle Prognosefehler zugeordnet werden können. Am Ende dieses Schrittes liegt somit eine Menge von zweidimensionalen, empirischen Häufigkeitsverteilungen $HV_{k,e,bz}^{PF}$ vor, welche den zu erwartenden Prognosefehler auf Kunden-/ Erzeugnisebene für eine beliebige Periode des zweiten Teilhorizonts mehrwertig beschreibt.

5.1.4 Klassifikation der Bestellinformationen

Ausgangspunkt dieses Teilschrittes sind die unvollständigen Verläufe der zum Planungszeitpunkt angemeldeten Bestellungen $uZR_{k,e,b}^{BoM}$, $uZR_{k,e,b}^{BoT}$ sowie die realisierten, historischen Bestellmengen $ZR_{k,e}^{VoM}$ auf Kunden-/ Erzeugnisebene. Die Klassifikationsaufgabe besteht im Wesentlichen darin, den Grad der Übereinstimmung zwischen den genannten Zeitreihen und den entsprechenden Mustern $M_{k,e}^{Bo}$ bzw. $M_{k,e}^{Vo}$ zu ermitteln und für die Weiterverarbeitung zu speichern. Um dies zu erreichen sind die folgenden Teilschritte durchzuführen:

1. Definition des Distanzmaßes
2. Ermitteln des Entwicklungsfortschritts der Muster
3. Berechnen und speichern der Klassifikationsgüten

Die Ausgestaltung der Teilschritte hängt von der Art des betrachteten Musters ab. Wie in den vorangegangenen Abschnitten wird daher mit der Darstellung der verbrauchsorientierten Variante begonnen und im Anschluss abweichende Aspekte der bedarfsorientierten geschildert. Zur Illustration des gesamten Vorgangs dient Abbildung 18.

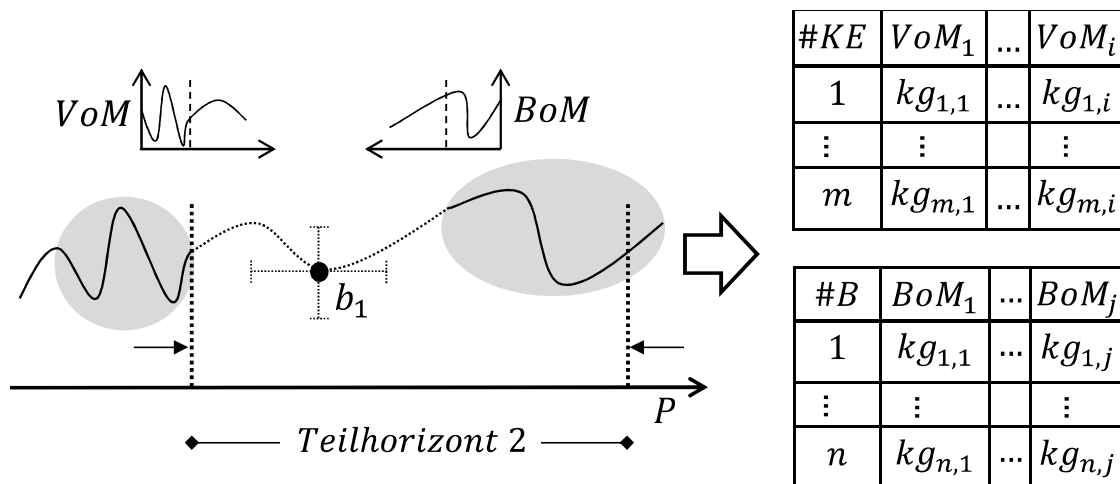


Abbildung 18: Schematische Grobdarstellung der Klassifikationsaufgabe (erweiterte Visualisierung in Anlehnung an [HB10])

Im Fall der verbrauchsorientierten Klassifikation wird die Distanzfunktion in Anlehnung an Formel (5.1) realisiert. Der Unterschied resultiert aus den zu vergleichenden Objekten, wobei es sich um eine Zeitreihe und ein Muster handelt. Letzteres besteht aus einer Menge von Häufigkeitsverteilungen. Die Teildistanz td definiert daher anhand von Formel (5.5) zunächst die Entfernung zwischen einem bestellmengenbezogenen Zeitreihenwert val und der durch Schwerpunkte sp_k sowie Häufigkeiten h_k gegebenen Häufigkeitsverteilung HV . Die Gesamtdistanz d eines Musters M und einer Zeitreihe ZR (jeweils der Länge ml) ergibt sich als Wurzel der addierten Teildistanzen zwischen den Zeitreihenwerten und Häufigkeitsverteilungen in Form von Formel (5.6).

$$td(val, HV) = \sum_{k=1 \dots n^{HVK}} (sp_k^{HV} - val)^2 * h_k^{HV} \quad (5.5)$$

$$d(ZR, M) = \sqrt{\sum_{u=1 \dots ml} td(elem(ZR, u), elem(M, u))} \quad (5.6)$$

Mithilfe der Funktion d kann anschließend der Entwicklungsfortschritt der vorhandenen Muster bestimmt werden. Dazu wird je Kunde k und bezogenem Erzeugnis e die Zeitreihe $ZR_{k,e}^{VoM}$ zugrunde gelegt und mit allen Mustern $M_{k,e}^{Vo}$ verglichen. Der Vorgang des Vergleichens umfasst jeweils die Distanzberechnung zwischen Muster M und Zeitreihe ZR , wobei M ausgehend von der maximalen bis zur minimalen Überdeckung bzgl. ZR schrittweise um eine Periode in Richtung Zukunft verschoben wird. Die maximale Überdeckung ist genau die Position des Musters in Bezug auf die Zeitreihe, bei der die Häufigkeitsverteilungen $1, \dots, ml - 1$ die letzten $ml - 1$ Zeitreihenwerte betreffen. Im Fall der minimalen Überdeckung wurden lediglich die Verteilungen $1, \dots, n^{minKP}$ mit den letzten n^{minKP} Werten der Zeitreihe in Bezug gesetzt. Damit verringert sich der zur Klassifikation genutzte Anteil des Musters iterativ zugunsten des verbleibenden Prognoseteils. Sei kp die Anzahl der zur Klassifikation genutzten Perioden. Sei ferner TZR_{kp}^{VoM} die Teilzeitreihe der letzten kp Werte aus ZR^{VoM} und $TVoM_{kp}$ das Teilmuster der ersten kp Häufigkeitsverteilungen aus VoM , dann ergeben sich die relevanten Distanzen d_{kp} jeweils durch Formel (5.6) mit $d(TZR_{kp}^{VoM}, TVoM_{kp})$ ⁵⁴. Es ist davon auszugehen, dass die Distanz mit der Anzahl der zur Klassifikation genutzten Perioden steigt. Der Entwicklungsfortschritt entspricht infolgedessen dem zur Klassifikation genutzten Anteil des Musters, für den die mittlere quadrierte Distanz pro Klassifikationsperiode

⁵⁴ Für Teilzeitreihen die keine Bestellmenge größer null enthalten wird die Distanz als ∞ definiert.

minimal ist⁵⁵. Die Position innerhalb des betrachteten Überdeckungsintervalls an der diese Bedingung gilt, stellt den Beginn des potenziellen musterbasierten Verlaufs dar. Um festzustellen ob dieser tatsächlich als musterbasiert angenommen werden kann, ist die ermittelte minimale Distanz d^{min} sowie die zugehörige Länge des zur Klassifikation genutzten Musterteils kp^{min} mit dem entsprechenden Parameter R ins Verhältnis zu setzen. Resultiert aus $\frac{R_{k,e,kp^{min}} - d^{min}}{R_{k,e,kp^{min}}}$ ein Ergebnis größer gleich null, wäre die Teilzeitreihe auch im Rahmen der Mustererkennung als Treffer des Teilmusters identifiziert worden, sodass hier von einer erfolgreichen Klassifikation mit einer dem Verhältnis entsprechenden Güte ausgegangen werden kann. Im Gegensatz dazu indiziert ein negatives Ergebnis einen Verlauf der nicht dem Muster entspricht, weshalb die Klassifikationsgüte KG auf null gesetzt wird. Für Muster mit positiver Kennzahl deren Prognoseteil den zweiten Teilhorizont allerdings nicht vollständig überspannt wird durch sukzessive Klassifikation versucht den Prognosehorizont zu erweitern. Der Prognoseanteil ist dazu auf die erwartete Bestellmenge je Periode zu reduzieren, sodass die resultierende Zeitreihe wiederum mit allen weiteren Mustern verglichen werden kann. Dieser Prozess setzt sich fort, bis entweder kein Muster erfolgreich klassifiziert wird oder die konkatenierten Prognoseanteile der Muster eine bzgl. n^{H2} ausreichende Länge aufweisen. Wurde eine erfolgreiche Verkettung von Mustern durchgeführt, ist dieses bisher nicht beobachtete Muster der Menge $KM_{k,e}^{VO}$ hinzuzufügen sowie dessen Klassifikationsgüte multiplikativ durch die Einzelgüten zu berechnen. Am Ende der verbrauchsorientierten Klassifikation steht damit die Menge $KG_{k,e,m}^{VoM}$ zur Verfügung, die jedem Kunden, Erzeugnis und den entsprechend ermittelten (und kombinierten) Mustern eine Güte aus $[0,1]$ zuordnet.

Die bedarfsorientierte Klassifikation nutzt das durch Formel (5.6) definierte Distanzmaß, unterscheidet sich jedoch in dessen Anwendung aufgrund der zusätzlichen Termindimension. Um den Entwicklungsfortschritt der ermittelten Muster zu bestimmen, wird je Kunde k , bezogenem Erzeugnis e und nicht fixierter Bestellung b geprüft, ob dessen Liefertermin im Bereich des zweiten Teilplanungshorizonts liegt. Im positiven Fall werden die Zeitreihen $uZR_{k,e,b}^{rBoM}$, $uZR_{k,e,b}^{rBoT}$ zugrunde gelegt und mit allen Mustern $M_{k,e}^{Bo}$ verglichen. Das Verschieben eines Musters M von der maximalen bis zur minimalen Überdeckung entspricht grundsätzlich dem Vorgehen der verbrauchsorientierten Variante⁵⁶. Zur Berechnung der in diesem Zusammenhang notwendigen Distanzen sind

⁵⁵ Ist die minimale mittlere Distanz nicht eindeutig, so wird jene mit kleinstem zugehörigem Klassifikationsanteil gewählt.

⁵⁶ Die Länge der Zeitreihen $uZR_{k,e,b}^{rBoM}$, $uZR_{k,e,b}^{rBoT}$ kann jedoch geringer als die des Musters sein und damit jeweils das in die Distanzberechnung eingehende Überdeckungsintervall beschränken.

allerdings jeweils die mengenbasierte und terminbasierte Einzeldistanz zu ermitteln. Infolgedessen lässt das Kriterium einer mittleren Minimaldistanz je Klassifikationsperiode keine Bestimmung des Entwicklungsfortschritts von M zu, da es im Allgemeinen nicht zu einem in beiden Dimensionen identischem Ergebnis führt. Um eine simultane Auswertung ohne direkte Verrechnung von Mengen- und Termindistanzen zu realisieren werden zunächst deren zugehörige Klassifikationsgüten berechnet⁵⁷. Dies führt zu einer geeigneten Normierung der betreffenden Distanzwerte und ermöglicht, unter der Annahme das keine Dimension präferiert wird, die aggregierte Betrachtung durch Bildung der mittleren Klassifikationsgüte. Die Position innerhalb des betrachteten Überdeckungsintervalls an der die maximale mittlere Klassifikationsgüte bei gleichzeitig positiven Einzelgüten vorliegt, stellt daher den Beginn des musterbasierten Verlaufs dar und definiert den Grad an Übereinstimmung. Erfüllt keine Position die genannte Bedingung oder hat das Intervall eine Länge von null, konnte das betreffende Muster nicht zugeordnet werden. Am Ende der bedarfsorientierten Klassifikation steht damit die Menge $KG_{k,e,b,m}^{BoM}$ zur Verfügung, die jeder nicht fixierten Bestellung eines Kunden für ein Erzeugnis und den entsprechend ermittelten Mustern, eine Güte aus $[0,1]$ zuordnet.

5.1.5 Ableiten von Bedarfsszenarien

Auf Basis der gefundenen verbrauchs-/ bedarfsorientierten Muster, der ermittelten Prognosefehlerverteilungen und des Klassifikationsresultats zum Planungszeitpunkt obliegt es der Szenariogenerierung die zu betrachtenden alternativen Gesamtbestellungen je Tag und Erzeugnis abzuleiten, um die unsichere Zukunft zielführend antizipieren zu können (vgl. Abschnitt 5.2.1). Im Kontext dieser Aufgabe ist zunächst auf Kunden-/ Erzeugnisebene festzulegen, ob die zukünftige Nachfrage verbrauchs- oder bedarfsorientiert abgeschätzt werden soll. Bei getroffener Entscheidung werden möglichst musterbasierte Datenbasen bereitgestellt, aus denen nachgelagert Bestellalternativen unter Berücksichtigung der betreffenden Gewichte zu selektierenden sind. Wurden alle bezogenen Erzeugnisse aller Kunden auf diese Art betrachtet, sind die vorliegenden Bestellmöglichkeiten zu einer Teilmenge der potenziellen Bedarfsverläufe zusammenzufassen, sodass ein Szenarioset als Approximation der Unsicherheit bereitsteht. Abbildung 19 stellt den Ablauf dieser wesentlichen Schritte anschaulich dar, bevor deren detaillierte Beschreibung folgt.

⁵⁷ Die Berechnung erfolgt gleichartig zum verbrauchsorientierten Fall, wobei je Dimension die betreffende Distanz und der Wert des Parameters R (in Abhängigkeit der Anzahl an Klassifikationsperioden) zur Verhältnisbildung genutzt werden.

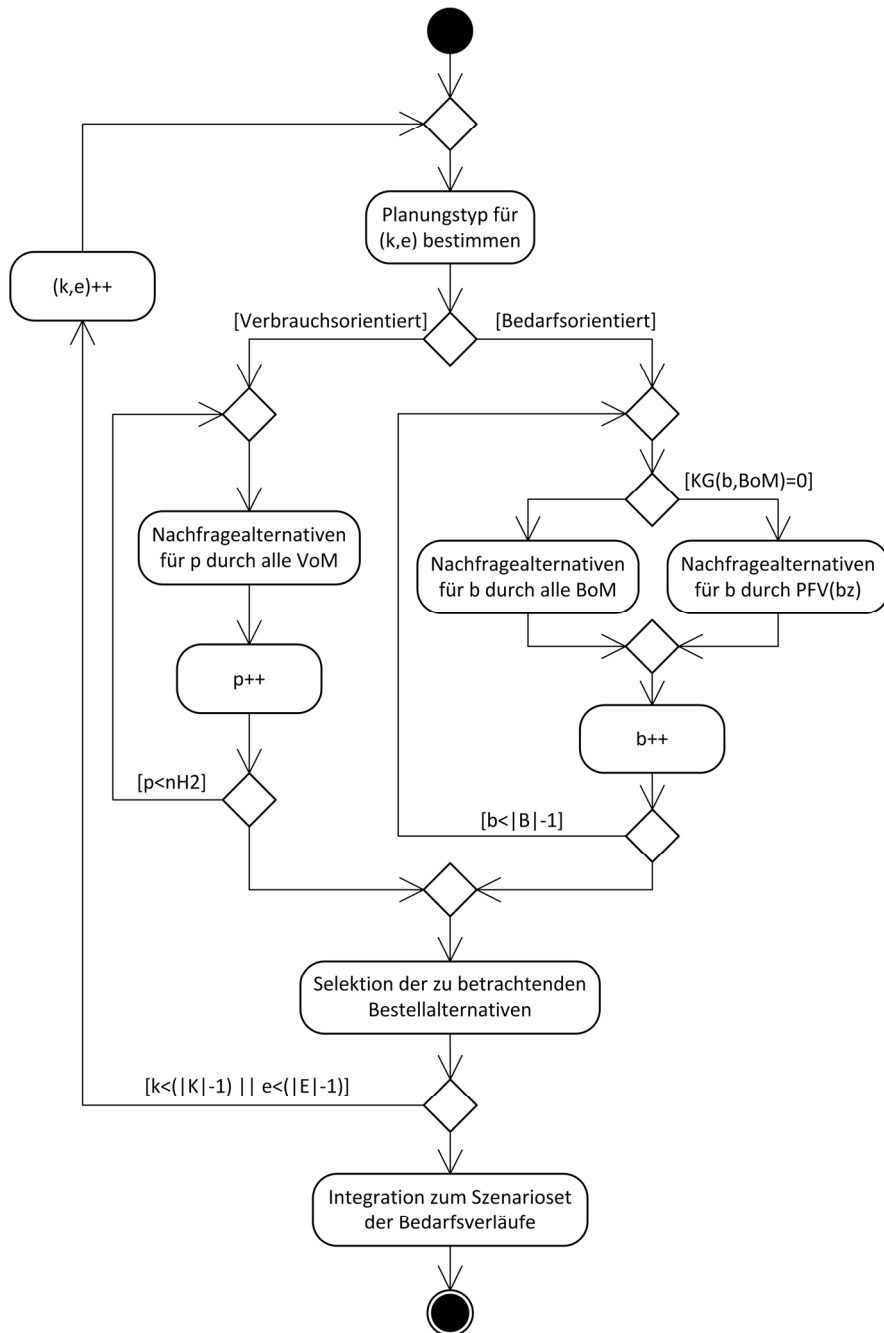


Abbildung 19: Grob Ablauf der Szenariosetgenerierung

Die Entscheidung über den zu verwendenden Planungstyp erfolgt regelbasiert. Grundsätzlich wird die bedarfsorientierte Variante bevorzugt, da diese die gelieferten Bestellinformationen der Kunden berücksichtigt, anstatt ausschließlich auf historische Bestellmengen zurückzugreifen. Es ist allerdings anzumerken, dass verbrauchsorientierte Muster erfolgreich zur Anwendung kommen können, wenn dies bedarfsorientiert nicht der Fall ist. Da der musterbasierte Ansatz soweit wie möglich verfolgt werden soll und

eine Kombination von verbrauchs-/bedarfsorientierter Planung auf Kunden-/ Erzeugnis-ebene nicht ohne Weiteres zweckmäßig ist⁵⁸, ergeben sich die folgenden Regeln:

1. **Verbrauchsorientiert:** Mindestens ein verbrauchsorientiertes Muster (VoM) ist klassifiziert, sodass dessen Prognoseanteil den Teilhorizont zwei überdeckt und nicht alle Bestellungen $B_{k,e}$ wurden bzgl. einem $m \in M_{k,e}^{BO}$ klassifiziert
2. **Bedarfsorientiert:** In allen anderen Fällen, wobei je Bestellung b ohne geeignetes bedarfsorientiertes Muster (BoM) auf die Prognosefehlerverteilung (PFV) ausgewichen wird

Das Vorgehen zur Ermittlung der potenziellen Nachfragealternativen sowie des nachgelagerten Selektionsprozesses unterscheidet sich je nach verwendeter Datengrundlage, weshalb die drei möglichen Varianten (VoM, BoM, PFV) sukzessiv vorgestellt werden. Im ersten Fall wurde der betreffende Bestellmengenverlauf $ZR_{k,e}^{VoM}$ mit einem Muster m aus $M_{k,e}^{VO} \cup KM_{k,e}^{VO}$ erfolgreich klassifiziert. Da die verbrauchsorientierten Regelmäßigkeiten absolute Mengen je Periode abbilden, folgen die künftigen Alternativen direkt aus den empirischen Häufigkeitsverteilungen die nicht zur Klassifikation genutzt wurden und eine Periode des zweiten Teilplanungshorizonts betreffen. Existieren Muster M deren Verlauf zunächst ähnlich ist, können mehrere Klassifikationen erfolgreich sein. In diesem Fall wird durch Auswertung der ggf. unterschiedlichen Klassifikationsgütern $KG_{k,e,m}^{VoM}$ festgelegt, wie viele Instanzen IS je Muster in das Szenarioset eingehen. Sei n^S die Anzahl der gesuchten Szenarien, dann gilt je $m \in M$:

$$IS_m = \begin{cases} \text{round} \left(\frac{KG_{k,e,m}^{VoM}}{\sum_{i \in M} KG_{k,e,i}^{VoM}} * n^S \right), & m < |M| \\ n^S - \sum_{1 \leq i < |M|} IS_i, & m = |M| \end{cases} \quad (5.7)$$

Die selektive Auswahl einzelner Bestellalternativen folgt für ein beliebiges Muster aus der sukzessiven Anwendung der in Abschnitt 3.2.2 vorgestellten LHS-Methode bezüglich aller relevanten Perioden. Allerdings wird die Bestellmenge je gleichgewichtetem Intervall I nicht randomisiert, sondern deterministisch als Mittelwert bestimmt, wobei in diesem Zusammenhang der Verlauf des kumulierten Gewichts $\sum h_k$ hinsichtlich I zu berücksichtigen ist. Abbildung 20 veranschaulicht den Vorgang für ein exklusiv klassifiziertes Muster und drei zu berechnenden Bestellalternativen. Insbesondere wird deut-

⁵⁸ Zum Planungszeitpunkt sind die Termine an denen die angemeldeten Bestellungen tatsächlich realisiert werden nicht bekannt. Aus diesem Grund kann ein verbrauchsorientiertes Muster nicht punktuell (wie es bei einer Kombination nötig wäre), sondern nur vollständig im Bereich des relevanten Teilhorizonts genutzt werden.

lich, dass im Bereich hoch gewichteter Bestellmengenintervalle eine detaillierte Selektion der Alternativen stattfindet als für vergleichsweise niedrig gewichtete. Da ein Muster stets eine Folge zeitlich abhängiger Nachfragen repräsentiert, liegen als Ergebnis für eine Kombination aus Kunde und Erzeugnis verbrauchsorientierte Bestellmengenalternativen $BM_{k,e,p,m}^{VoM}$ in Abhängigkeit von p und m vor.

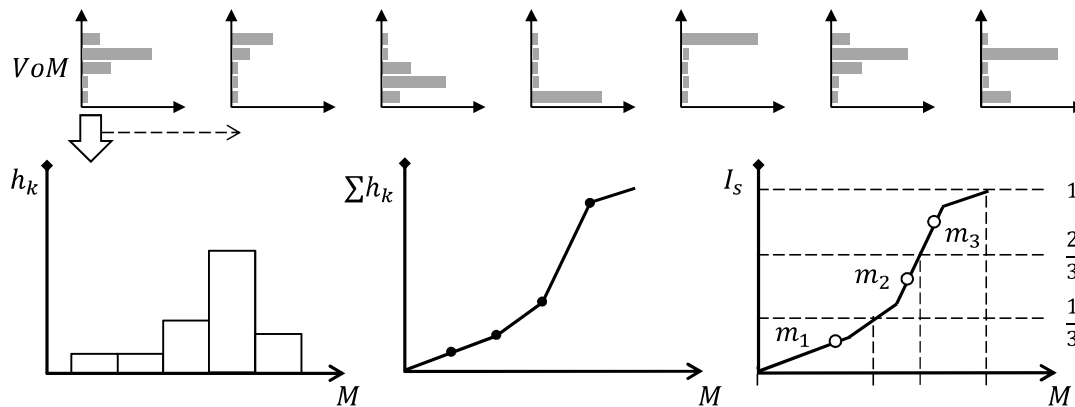


Abbildung 20: Ablauf der Selektion alternativer Bestellmengen unter Verwendung eines verbrauchsorientierten Musters am Beispiel

Wurde eine Menge bedarfsorientierter Muster M erfolgreich bzgl. der betrachteten Bestellung b klassifiziert, ist je $m \in M$ zu prüfen, welche Bestellalternativen der nicht zur Klassifikation benutzten Datenpunkte zu einer Fixierung von b führen. Hierzu werden die verbleibenden Prognosepunkte PP von m in aufsteigender Reihenfolge betrachtet und für jede Terminklasse ΔT des aktuellen $pp \in PP$ Formel (5.8) ausgewertet.

$$elem(uZR_{k,e,b}^{aBoT}, 0) - \text{Planungsdatum} + \Delta T - pp \stackrel{?}{\leftrightarrow} n^{H1} + 1 \quad (5.8)$$

Wird diese Bedingung erfüllt, ist die zu $(pp, \Delta T)$ gehörige Bestellmengenverteilung der Periode $n^{H1} + pp$ des aktuellen Planungshorizonts zuzuordnen, sofern dort nicht bereits Daten eines besser klassifizierten Musters vorliegen. Der beschriebene Vorgang wiederholt sich bis alle Prognosepunkte betrachtet wurden oder die einzig vorhandene Terminklasse eines Prognosepunktes zur Bestellfixierung führt. Die Gewichte der so ermittelten Bestellalternativen werden entsprechend der Verhältnisse aller zugehörigen Klassifikationsgüten der Muster angepasst und in Summe auf eins normiert. Darüber hinaus sind die relativen Bestellmengen durch Multiplikation mit $elem(uZR_{k,e,b}^{aBoM}, 0)$ in absolute Mengen zu überführen. Der sich anschließende Selektionsprozess kann auf jenen der verbrauchsorientierten Muster zurückgeführt werden, indem die zusätzliche Termdimension als eindeutige Ordnung ausschließlich mengenbasierter Histogramme

interpretiert wird. Im Gegensatz zum verbrauchsorientierten Fall existiert für die weiteren Berechnungen keine Notwendigkeit zur Betrachtung des zeitlichen Verlaufs, sodass eine Separation der Ergebnisse nach den zugrunde liegenden Mustern ausbleibt. Wegen der bestellorientierten Betrachtungsweise liegen damit als Ergebnis kunden-, erzeugnis- und bestellungsgebundene Mengenalternativen $BM_{k,e,b,p}^{BoM}$ in Abhängigkeit von p vor.

Soll eine angemeldete Bestellung auf Grundlage der ermittelten Prognosefehlerverteilungen $HV_{k,e,bz}^{PF}$ fortgeschrieben werden, ist zuerst der aktuelle Bezugspunkt bz im Planungshorizont zu ermitteln, welcher sich wie folgt ergibt:

$$bz = last(uZR_{k,e,b}^{aBoT}) - Planungsdatum - n^{H1} - 1 \quad (5.9)$$

Da die resultierende Verteilung $HV_{k,e,bz}^{PF}$ lediglich relative Mengen- und Terminänderungen in Bezug auf eine zu bz angemeldete Bestellung abbildet, sind im nächsten Schritt die absoluten Werte der aktuellen Bestellinformationen zu ermitteln⁵⁹. Im Fall der Bestellmengen resultieren diese durch Multiplikation des anteiligen Wertes mit $last(uZR_{k,e,b}^{aBoM})$, wohingegen die absoluten Bestelltermine additiv durch den relativen Wert und $last(uZR_{k,e,b}^{aBoT})$ definiert sind. Die Bestellmengenalternativen jedes absoluten Termins beziehen sich auf die Planungsperiode, dessen Index mit der um eins verringerten Anzahl Tage zwischen Planungszeitpunkt und betreffendem Termin übereinstimmt. Der Selektionsschritt entspricht dem der bedarfsorientierten Muster und wird daher nicht erneut aufgegriffen. Das Ergebnis geht in diesem nicht musterbasierten Fall aus den kunden-, erzeugnis- und bestellungsgebundenen Mengenalternativen $BM_{k,e,b,p}^{PFV}$ in Abhängigkeit von p hervor.

Nachdem auf Kunden-/Erzeugnisebene jeweils bedarfs- oder verbrauchsorientierte Bestellalternativen möglichst musterbasiert ermittelt wurden, ist auf dieser Grundlage eine Menge von kunden- und bestellungsunabhängigen Bedarfsverläufen zu generieren, welche die Unsicherheit realistisch abbildet. Dazu werden für ein Szenario s alle Kunden k und deren (im Teilhorizont zwei) bezogenen Erzeugnisse e betrachtet. Gilt $H1_{k,e} > n^{H1}$ liegen bereits sichere Bestellinformationen für $n^{H1} < p \leq H1_{k,e}$ vor, sodass die betreffenden Mengen identisch in alle Szenarien eingehen. Je nach verwendeter Datenbasis liegen für k, e außerdem selektierte Mengenalternativen periodenbasiert durch $BM_{k,e,p,-}^{VoM}$ oder bestellungs-basiert durch $BM_{k,e,b,-}^{BoM}$ bzw. $BM_{k,e,b,-}^{PFV}$ vor. Da das Eintreten eines spezifischen musterbasierten Verlaufs oder Prognosefehlers als weitestgehend

⁵⁹ Sollte die Verteilung keine Elemente beinhalten, da bisher keine entsprechenden historischen Bestellverläufe auftraten, wird iterativ der nächstgrößere Bezugspunkt verwendet.

unabhängig von allen anderen Ereignissen angesehen werden kann, ist aus der jeweils betreffenden Menge von Bestellalternativen ein zufälliges Element zu extrahieren und den Szenariobedarfen $n_{e,p,s}^{Bedarf}$ hinzuzufügen⁶⁰. Ist an der entsprechenden Position bereits ein Bedarf vorhanden, werden diese unabhängigen Mengen additiv zusammengefasst. Im verbrauchsorientierten Fall muss berücksichtigt werden, dass die erste Periodenmenge den zu verwendenden Musterindex m für die verbleibenden Periodenmengen des aktuellen (k, e, s) -Tripels determiniert. Nach vollständiger Integration der Bestellalternativen in das Szenarioset liegen genau n^S viele potenzielle Bedarfsverläufe vor. Zur Sicherstellung der Effektivität und Effizienz im Kontext der Steuerung wird der bisher vorgestellte Ablauf derart angepasst, dass zunächst $c * n^S$ Szenarien generiert werden, welche das Spektrum vom maximalen Verzugsrisiko bis zum maximalen Lagerrisiko durch eine größere Streuung der Bedarfshöhen und –zeitpunkte besser abdecken. Bei diesem Vorgang werden viele sehr ähnliche Alternativen generiert. Um dennoch eine gewisse Heterogenität zu wahren und damit die Komplexitätssteigerung jedes weiteren Szenarios zu rechtfertigen, werden im Anschluss solange die gleichartigsten Elemente zusammengefasst, bis die Kardinalität der Menge dem Parameter n^S entspricht. Die Ähnlichkeit lässt sich als Erweiterung von Formel (5.1) als mittlere euklidische Distanz zwischen den erzeugnispezifischen Zeitreihen der zu vergleichenden Szenarien ermitteln. Die Anzahl der zu einem Szenario zusammengefassten Alternativen bestimmt das zugehörige Gewicht n_s^{SG} , wodurch die nachfolgende Optimierung mit einer relativ geringen Anzahl möglichst relevanter Fälle und einer auf Basis der vorhandenen Bestellinformationen ermittelten Gewichtung zueinander durchgeführt werden kann.

5.2 Entwicklung des mathematischen Planungsmodells als Steuerungsgrundlage

Die im vorangegangenen Abschnitt entwickelte Methode zur Abbildung der Bedarfsunsicherheit liefert als Ergebnis eine Menge von möglichen künftigen Bedarfsszenarien. Zur Gewinnmaximierung bei gegebener Bedarfsunsicherheit wird nachfolgend in Abschnitt 5.2.1 der Modellierungsansatz vorgestellt, auf dessen Grundlage die zur Modellbildung notwendige Eingabe (Abschnitt 5.2.2) sowie die gesuchte Ausgabe (Abschnitt 5.2.3) definiert werden. Die Beschreibung des gemischt ganzzahligen Planungsmodells folgt in Form der Zielfunktion (Abschnitt 5.2.4) sowie den Restriktionen (Abschnitt

⁶⁰ Grundsätzlich ist auch eine mengenbasierte Auswahl der Elemente möglich. Damit wird jedoch eine im Allgemeinen nicht gegebene Korrelation unterstellt, sodass die Güte der approximierten Bestellmengenverteilung abnimmt. Konkret ist von einer unnötigen Erhöhung der Bestände auszugehen, was dem Ziel der Gewinnmaximierung widerspricht.

5.2.5). Zur Bewältigung der Modellkomplexität schließt sich in Abschnitt 5.2.6 die Darstellung der problemspezifischen Heuristik zur Generierung einer Startlösung an.

5.2.1 Systematisierung der Modellierung

Die Berücksichtigung der Bedarfsunsicherheit wurde als eine elementare Anforderung der gewinnmaximierenden Steuerung identifiziert. Grundlage zur Umsetzung der modellbasierten Problemlösung ist das Konzept rollierender Horizonte, welches zugleich maßgeblichen Einfluss auf die zielführende Integration der unsicheren Bedarfe ausübt. Eine explizite Abbildung der ermittelten Szenarien kann je Planungszyklus durch die folgenden beiden zweistufigen Modellierungsalternativen geleistet werden:

- A. Vor Realisation der Bedarfsunsicherheit ist ein Plan für den gesamten Planungshorizont zu generieren. Durch die Realisation der szenarioabhängigen Bedarfe ergeben sich die Fehlmengen oder Lagerbestände, wobei zum Entscheidungszeitpunkt der Plan mit maximalem erwartetem Gewinn im Gesamthorizont gesucht ist.
- B. Vor Realisation der Bedarfsunsicherheit ist ein Plan für (mindestens) den Teil des Planungshorizonts zu generieren, welcher bis zum folgenden Planungszyklus umgesetzt wird. Auf die Realisation der szenarioabhängigen Bedarfe kann durch einen Alternativplan je Szenario reagiert werden. Zum Entscheidungszeitpunkt ist der Plan gesucht, welcher den erwarteten Gewinn unter Berücksichtigung der Alternativpläne im Gesamthorizont maximiert.

Beide Alternativen werden für einen beliebigen Planungszeitpunkt (*) und -horizont PH beispielhaft mit drei Szenarien S durch Abbildung 21 grafisch gegenübergestellt.

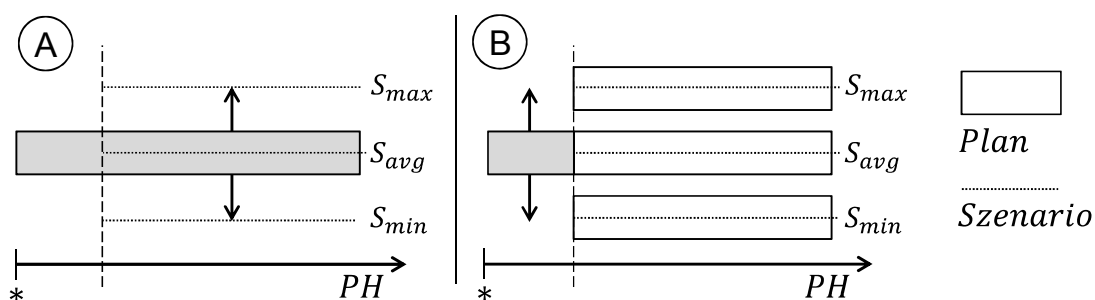


Abbildung 21: Integration von Bedarfsunsicherheit im Planungsmodell

Während bei Alternative A davon ausgegangen wird, dass alle Entscheidungen im Planungshorizont zum Zeitpunkt der Durchführung fixiert werden müssen, dient der Horizont in Alternative B lediglich zur Antizipation der unsicheren Zukunft und entspricht

damit der Entscheidungssituation in einem Zyklus der rollierenden Planung. Aufgrund der Modellierung alternativer Pläne sind Verzugs Mengen (und Kosten) als Kompensationsgrößen weitestgehend verzichtbar, sodass Entscheidungen bezüglich unsicherer Bedarfe im Planungshorizont realistisch abgewogen und gegebenenfalls aufgeschoben werden können. Gerade im Rahmen der vorgestellten Szenariogenerierung erscheint dies zweckmäßig, da sich mit fortschreitender Entwicklung der Mengen- und Terminzeitreihen von Kundenbestellungen die Zuverlässigkeit der Vorhersage tendenziell erhöht. Infolgedessen werden insbesondere überhöhte Lagerbestände aber auch Rüst-/Wartungszeit, Fehlmengen sowie die jeweils induzierten Kosten umgesetzter, suboptimaler Maßnahmen vermieden. Neben den dargestellten Vorteilen liegt der wesentliche Nachteil der Modellierungsalternative B in der drastischen Komplexitätssteigerung, da sich die Menge der Entscheidungsvariablen nahezu um den Faktor der Szenarioanzahl vervielfacht. Insbesondere in der rollierenden Planung ist jedoch eine hohe Lösungsgüte gefordert, da sich schon geringe Abweichungen deutlich im vergleichsweise kleinen Teilhorizont des Planabstands manifestieren können und lediglich dieser realisiert wird. Eine geeignete Modellierung zur Komplexitätsreduktion scheint daher unabdingbar, weshalb sich die Vorstellung des Aggregationsschemas anschließt. Die Grundlage bildet eine zeitliche Anpassung des Detaillierungsgrades der problemrelevanten Planungsaspekte im Horizont des jeweiligen Planungszyklus. Die Reduktion der Genauigkeit wird durch das Vorgehen der rollierenden Planung gerechtfertigt, wobei sich zwei Aspekte unterscheiden lassen:

1. **Auswirkung eines bekannten Bedarfs:** Die bedarfserfüllende Produktion wird durch gewinnmaximierende Planungsmaßnahmen gegebenenfalls eher durchgeführt als nötig. Dabei ist festzustellen, dass die Chance der Einflussnahme eines Bedarfs auf den Bereich der zu realisierenden Entscheidungen mit fortschreitendem Planungshorizont abnimmt (vgl. Abschnitt 2.2.2). Es handelt sich demnach häufig um revidierbare Planentscheidungen welche nicht gewinnwirksam sind.
2. **Unsicherheit der Bedarfsdaten:** Bedarfe welche noch relativ weit in der Zukunft liegen sind gegebenenfalls lediglich in aggregierter Form vorhanden. Darüber hinaus können sie bis zu dessen Fixierung noch vielfach geändert werden und sind aufgrund der geringen Informationsgrundlage (bzgl. verbrauchs-/ bedarfsorientierter Zeitreihen) tendenziell schwer vorherzusagen.

Es ist zu konstatieren, dass die Perioden im Planungshorizont zunehmend an Bedeutung für die aktuell zu treffenden Entscheidungen verlieren. Aus diesem Grund wird der Planungshorizont in drei Teilhorizonte mit sinkender Abbildungsgenauigkeit zergliedert, sodass sich die Komplexität je Horizont an dessen Relevanz orientiert. Tabelle 8 liefert eine Übersicht zu den jeweiligen Detaillierungsgraden, die im Anschluss sukzessiv vor-

gestellt werden. Es ist hervorzuheben, dass jede tatsächlich umzusetzende Entscheidung und damit retrospektiv der gesamte Produktionsplan grundsätzlich aus den Ergebnissen des ersten und genauesten Teilplanungshorizonts stammt. Die weiteren Teilhorizonte weisen ausschließlich antizipativen Charakter auf und werden nie realisiert.

	Teilhorizont 1	Teilhorizont 2	Teilhorizont 3
Perioden	Makroperioden auf Tagesbasis mit variablen Mikroperioden	Tagesperioden (Big Buckets)	Wochenperioden (Big Buckets)
Schichten	Auswahl auf Maschinenebene (je Makroperiode)	Auswahl auf Makroperiodenebene	Relaxierte Auswahl auf Makroperiodenebene
Bedarf	Rechtsverbindliche Bestellungen	Alternative Bestellszenarien	Erwartete Bestellmengen
Rüsten	Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten /-kosten	Erzeugnisabhängige Rüstzeiten -/kosten je Periode (selektiv periodenübergreifend)	Durchschnittliche Rüstzeiten -/kosten je Periode
Wartung	Kosten- /belastungsorientierte Wartung	Belastungsorientierte Wartung	Durchschnittliche Wartungszeiten-/kosten je Periode
Verzug	Ja (Lösbarkeit im Steuerungsprozess)	Nein	Nein

Tabelle 8: Übersicht der Detaillierungsgrade des zeitbasierten Aggregationsschemas

Der erste Teilhorizont ist jener mit höchster Planungsgenauigkeit und basiert auf dem Modell des GLSP. Die Länge des Horizonts folgt unmittelbar aus dem bereits im Rahmen der Szenariogenerierung spezifizierten Parameter n^{H1} . Während die Makroperioden der Modellierung von Lagerabgängen und einer Schichtplanung auf Maschinenebene dienen, werden die Mikroperioden mit variabler Länge zur Abbildung von reihenfolgeabhängigen Rüstvorgängen und der genauen Bestimmung optimaler Wartungszeitpunkte genutzt. Damit die Lösbarkeit des Modells auch im Fall von Fehlplanungen

(insbesondere bei bereits hoher Auslastung) sichergestellt ist werden Fehlmengen berücksichtigt, welche schnellstmöglich aufzuholen sind. Im anknüpfenden Teilplanungshorizont über dessen Länge ebenfalls Kenntnis vorliegt (Parameter n^{H2}), werden die Mikroperioden des Modells vernachlässigt. Die Schichtplanung wird dahingehend vereinfacht, dass die Auswahl für alle parallelen Maschinen identisch zu sein hat, aber weiterhin je Makroperiode änderbar ist. Als Komplexitätstreiber erweist sich die szenariobasierte Abbildung der Bedarfsunsicherheit, welche jedoch im Nahbereich der zu realisierenden Planungsentscheidungen von großer Bedeutung ist. Als Konsequenz dieser Modellierung erfolgt die Produktion szenarioabhängig und die Betrachtung von Fehlmengen wird obsolet. Durch den Verzicht der Reihenfolgeplanung vereinfacht sich die Optimierung der Rüstvorgänge auf ergebnisabhängige Entscheidungen je Periode bzw. für ausgewählte Szenarien periodenübergreifend⁶¹. Die Festlegung der Wartungszeitpunkte wird durch strikt einzuhaltende Belastungsintervalle simplifiziert. Im dritten und größten Teilplanungshorizont mit parametrierbarer Länge n^{H3} wird wie zuvor auf Mikroperioden verzichtet, wobei die Makroperiodengröße dem siebenfachen (Konstante $mult^{H3}$) der vorherigen Periodengröße entspricht. Zweck dieses Abschnitts ist es zum einen auf deutliche Nachfrageerhöhungen frühzeitig reagieren zu können und zum anderen zielführende Lagerbestände zum Ende des zweiten Teilhorizonts einzustellen. Dies ist bereits durch die tendenzielle Entwicklung der Nachfrage in Form des erwarteten Bedarfs möglich, sodass die komplexe szenariobasierte Modellierung in den entfernteren Perioden vereinfacht durchzuführen ist. Infolge der Periodengröße wird auf die Optimierung von Rüst- und Wartungsvorgängen verzichtet und stattdessen die zur Verfügung stehenden Schichtkapazitäten um die durchschnittlichen Rüst- und Wartungszeiten reduziert. Die bisherige Schichtmodellauswahl würde durch die veränderte Größe der Perioden das Planungsergebnis stark verfälschen⁶². Daher erfolgt (ausschließlich zur Antizipation der Zukunft) die Determinierung der Schichten relaxiert, was zu variablen Schichtkosten führt und dem Zweck dieses Teilhorizonts gerecht wird.

Nachfolgend wird das resultierende mathematische Modell in Form des deterministischen Äquivalents detailliert beschrieben. Es ist anzumerken, dass es sich bei dem vorgestellten Ansatz trotz der Einführung von Teilhorizonten um ein ganzheitliches Modell handelt. Die Optimalität der Lösung bleibt damit (in Bezug auf das Aggregationsschema) erhalten, was bei hierarchisch dekomponierten Ansätzen im Allgemeinen nicht garantiert werden kann.

⁶¹ Details hinsichtlich dieses Aspekts folgen bei der Beschreibung der betreffenden Restriktion in Abschnitt 5.2.5.

⁶² Siehe Fußnote 61.

5.2.2 Eingabe

Die Eingabe des mathematischen Planungsmodells erfolgt in Form von Mengen und Parametern. Die Mengen beinhalten als Elemente jeweils Indizes auf Basis der natürlichen Zahlen beginnend mit null. Folgende Mengen sind zu unterscheiden:

E	Menge der Erzeugnisse
M	Menge der parallelen, heterogenen Maschinen
P^{H1}, P^{H2}, P^{H3}	Menge der Makroperioden je betreffendem Teilplanungshorizont. Die Inkrementierung der Indexelemente erfolgt mengenübergreifend, d. h. es gilt: $P^{H1} \cap P^{H2} = \emptyset, P^{H1} \cap P^{H3} = \emptyset, P^{H2} \cap P^{H3} = \emptyset$
MP, MP_p	Menge der Mikroperioden insgesamt, bzw. bezüglich Makroperiode p . Die Inkrementierung erfolgt mengenübergreifend.
SM	Menge der möglichen Schichtmodelle
S	Menge der alternativen Bedarfsszenarien

Die Parameter dienen der Spezifikation einer konkreten Problem Instanz. Es lassen sich die nachfolgenden Größen differenzieren:

$n_{e,p}^{Bedarf} \in \mathbb{N}_0$	Primärbedarf in Mengeneinheiten von Erzeugnis e in Makroperiode p (bzgl. P^{H1} und P^{H3})
$n_{e,p,s}^{Bedarf} \in \mathbb{N}_0$	Primärbedarf in Mengeneinheiten von Erzeugnis e in Makroperiode p für Szenario s zur Abbildung der Unsicherheit
$n_{sm}^{PKapazität} \in \mathbb{N}_0$	Personalkapazität in Minuten durch die Auswahl von Schichtmodell sm
$n_{e,m}^{Taktzeit} \in \mathbb{N}$	Dauer in Minuten zur Herstellung einer Mengeneinheit von Erzeugnis e auf Maschine m
$n_{e,e_2}^{Rüstzeit} \in \mathbb{N}$	Dauer in Minuten zur Umstellung der Produktion von Erzeugnis e auf Erzeugnis e_2 ($e \neq e_2$)
$n_e^{Rüstzeit} \in \mathbb{N}$	Dauer in Minuten zur Umstellung der Produktion auf Erzeugnis e . Es gilt: $\forall e \in E: n_e^{Rüstzeit} = \frac{1}{ E -1} \sum_{e_2 \in E} n_{e_2,e}^{Rüstzeit}$
$n_m^{AvgRZ} \in \mathbb{R}^+$	Durchschnittlich benötigte Rüstzeit in Minuten je Makroperiode bezüglich Maschine m

$n_m^{WZeit} \in \mathbb{N}$	Dauer in Minuten zur Wartung von Maschine m
$n_m^{AvgWZ} \in \mathbb{R}^+$	Durchschnittlich benötigte Wartungszeit in Minuten je Makroperiode
$n_m^{WInt} \in \mathbb{N}$	Maximale Anzahl an Mengeneinheiten eines Normteils zwischen zwei Wartungsvorgängen auf Maschine m
$n_e^{WFaktor} \in \mathbb{R}^+$	Umrechnungsfaktor zur Bestimmung des Wartungszustands einer Maschine nach Produktion einer Mengeneinheit von Erzeugnis e
$n_e^{Erlös} \in \mathbb{N}$	Verkaufspreis pro Mengeneinheit von Erzeugnis e
$n_e^{LF} \in \mathbb{R}^+$	Umrechnungsfaktor zur Bestimmung des Lagerplatzbedarfs einer Mengeneinheit von Erzeugnis e in Bezug auf ein definiertes Normteil
$n_s^{SG} \in \mathbb{R}^+$	Gewichtungsfaktor von Szenario s . Es gilt: $\sum_{s \in S} n_s^{SG} = 1$
$bin_{e,m}^{Herstellbar} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Erzeugnis e auf Maschine m hergestellt werden kann
$k_e^{Lager} \in \mathbb{R}^+$	Kosten für die Lagerung einer Mengeneinheit von Erzeugnis e für die Dauer einer Makroperiode
$k_e^{Verzug} \in \mathbb{N}$	Kosten für die verspätete Verfügbarkeit einer Mengeneinheit von Erzeugnis e je Makroperiode
$k_{sm,pt}^{Personal} \in \mathbb{N}$	Kosten für die Bereitstellung der Personalkapazität durch Auswahl des Schichtmodells sm für den Periodentyp pt . Mögliche Indizes des Periodentyps stehen in aufsteigender Reihenfolge für einen Werktag, Samstag oder Sonntag/ Feiertag
$k_{sm}^{Personal} \in \mathbb{N}$	Kosten für die Bereitstellung der Personalkapazität durch Auswahl des Schichtmodells sm in Teilplanungshorizont drei
$k_{e,e_2}^{Rüsten} \in \mathbb{N}$	Kosten infolge einer Umstellung der Produktion von Erzeugnis e auf Erzeugnis e_2 . Es gilt: $\forall e \in E: k_{e,e}^{Rüsten} = 0$
$k_e^{Rüsten} \in \mathbb{N}$	Kosten infolge einer Umstellung der Produktion auf Erzeugnis e . Es gilt: $\forall e \in E: k_e^{Rüsten} = \frac{1}{ E -1} \sum_{e_2 \in E} k_{e_2,e}^{Rüsten}$
$k_m^{Wartung} \in \mathbb{N}$	Kosten infolge einer Wartung von Maschine m

$k_{e,m}^{Produktion} \in \mathbb{N}$	Kosten für die Produktion einer Mengeneinheit von Erzeugnis e auf Maschine m
$WZ_m^{Initial} \in \mathbb{N}_0$	Wartungszustand (d. h. verbleibende Anzahl an Mengeneinheiten eines Normteils bis zur nächsten Wartung) von Maschine m zu Beginn des Planungshorizonts
$RZ_{e,m}^{Initial} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Maschine m zu Beginn des Planungshorizonts für Erzeugnis e gerüstet ist
$LB_e^{Initial} \in \mathbb{N}_0$	Lagerbestand in Mengeneinheiten von Erzeugnis e zu Beginn des Planungshorizonts
$VM_e^{Initial} \in \mathbb{N}_0$	Verzugsmenge in Mengeneinheiten von Erzeugnis e zu Beginn des Planungshorizonts
$LB^{maxMe} \in \mathbb{N}$	Maximaler Lagerbestand in Mengeneinheiten in Bezug auf ein definiertes Normteil
$LB^{maxGe} \in \mathbb{N}$	Maximaler Lagerbestand in Geldeinheiten (Kapitalbindung)
$PW_m^{min} \in [0,1]$	Mindestanteil des Wartungsintervalls zwischen zwei Wartungsvorgängen bezüglich Maschine m
$mult^{H3} \in \mathbb{N}$	Multiplikator bezüglich Periodengröße in Teilhorizont drei im Verhältnis zu Teilhorizont eins und zwei
$BigM_{e,m}^{Produktion} \in \mathbb{N}$	Maximale Produktionsmenge in Mengeneinheiten von Erzeugnis e in einer Periode auf Maschine m

5.2.3 Ausgabe

Die Ausgabe des mathematischen Planungsmodells resultiert aus den im Anschluss dargestellten Variablen bzw. deren Belegung, nachdem das Modell gelöst wurde.

$prod_{e,mp,m} \in \mathbb{N}_0$	Produktionsmenge von Erzeugnis e in Mengeneinheiten innerhalb von Mikroperiode mp auf Maschine m
$prod_{e,p,m,s} \in \mathbb{N}_0$	Produktionsmenge von Erzeugnis e in Mengeneinheiten innerhalb von Makroperiode p auf Maschine m für Szenario s
$SMH1_{p,m,sm}^{bin} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Schichtmodell sm für Maschine m in Periode p gewählt ist

$SMH2_{p,s,sm}^{bin} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Schichtmodell sm in Periode p für Szenario s gewählt ist
$SMH3_{p,s,sm}^{rBin} \in [0,1]$	Gibt an, zu welchem Teil Schichtmodell sm in Periode p gewählt ist
$LB_{e,p} \in \mathbb{N}_0$	Lagerbestand von Erzeugnis e in Mengeneinheiten am Ende von Periode $p \in P^{H1}$
$LB_{e,p,s} \in \mathbb{N}_0$	Lagerbestand von Erzeugnis e in Mengeneinheiten am Ende von Periode $p \in P^{H2} \cup P^{H3}$ in Szenario s
$VM_{e,p} \in \mathbb{N}_0$	Verzugsmenge von Erzeugnis e in Mengeneinheiten am Ende von Makroperiode $p \in P^{H1}$
$RVH1_{e,e_2,mp,m}^{iBin} \in [0,1]$	Gibt an, ob ein Rüstvorgang von Erzeugnis e auf e_2 in Mikroperiode mp auf Maschine m stattgefunden hat
$RVH2_{e,p,m,s}^{bin} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob ein Rüstvorgang nach Erzeugnis e in Makroperiode p auf Maschine m für Szenario s stattgefunden hat
$RZH1_{e,mp,m}^{bin} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Maschine m zu Beginn von Mikroperiode mp für Erzeugnis e gerüstet ist
$RZ\ddot{U}_{e,p,m,s}^{bin} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob eine Rüstzustandsübertragung für Erzeugnis e von Periode $p - 1$ nach p in Szenario s erfolgt
$WV_{mp,m}^{bin} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob in Mikroperiode mp ein Wartungsvorgang für Maschine m durchgeführt wird
$WV_{p,m,s}^{bin} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob in Makroperiode p ein Wartungsvorgang für Maschine m in Szenario s durchgeführt wird
$hv_{mp,m}^{PW} \in \mathbb{R}^+$	Kumuliertes Produktionsvolumen der Maschine m am Ende von Mikroperiode mp seit der letzten Wartung
$hv_{mp,m}^{LPW} \in \mathbb{R}^+$	Hilfsvariable zur Linearisierung der Wartungsrestriktion von Maschine m je Mikroperiode mp

5.2.4 Zielfunktion

Ziel der Optimierung ist die Maximierung des Gewinns im vollständigen Planungshorizont ($P^{H1} \cup P^{H2} \cup P^{H3}$) je Planungszyklus. Der Gewinn G ist durch die Summe der Differenzen von Erlös und Kosten je Teilhorizont definiert, sodass zwischen sicheren monetären Größen und szenarioabhängigen Plangrößen differenziert wird, um zum Pla-

nungszeitpunkt Entscheidungen zu vermeiden welche sich im Hinblick auf die künftige Produktion negativ auswirken. Im ersten Horizont ergeben sich die Erlöse durch die tatsächlichen Bedarfsmengen aller Erzeugnisse E und Perioden $p \in P^{H1}$, die jeweils mit dem zugehörigen Verkaufspreis $n_e^{Erlös}$ multipliziert und aufsummiert werden. Dieses Vorgehen gilt grundsätzlich auch für Perioden bis n^{H2} . In dem Teilhorizont liegen jedoch infolge der Bestellunsicherheit szenarioabhängige Bedarfe vor, weshalb zusätzlich über die Menge der Szenarien S iteriert wird und die jeweiligen Erlöse und Kosten lediglich mit dem aktuellen Gewicht n_s^{SG} in die Berechnung eingehen. Der einzige Unterschied im dritten Teilhorizont resultiert aus dem Verzicht der integrierten Betrachtung alternativer Bedarfsentwicklungen, sodass eindeutige Parameter in Form des erwarteten Bedarfs Verwendung finden. Aufgrund der komplexeren Zusammensetzung der horizontabhängigen Kosten K^{H1} , K_S^{H2} und K_S^{H3} werden diese im Folgenden sukzessive erläutert.

$$\begin{aligned} \mathbf{max} \ G = & \sum_{e \in E} \sum_{p \in P^{H1}} n_{e,p}^{Bedarf} * n_e^{Erlös} - K^{H1} \\ & + \sum_{s \in S} n_s^{SG} * \left(\sum_{e \in E} \sum_{\substack{p \in P^{H2} \\ \cup P^{H3}}} \begin{cases} n_{e,p,s}^{Bedarf} * n_e^{Erlös} , p \in P^{H2} \\ n_{e,p}^{Bedarf} * n_e^{Erlös} , sonst \end{cases} - K_S^{H2} - K_S^{H3} \right) \end{aligned} \quad (5.10)$$

Die Kosten der Teilplanungshorizonte setzen sich aus den Elementen der Schichtmodell-, Produktions-, Lagerbestands-, Verzugs-, Wartungs- und Rüstkosten⁶³ additiv zusammen. Für Teilhorizont eins sind die Schichtmodellkosten $k_{sm,\psi(p)}^{Personal}$ durch die Summe aller gewählten Schichtmodelle für die vorhandenen Maschinen je Makroperiode P^{H1} definiert, wobei der Kostensatz maschinenunabhängig ist, aber vom Kalendertag abhängt. Die Funktion ψ ermittelt daher für Makroperiode p , ob es sich um einen Werktag, Samstag oder Sonntag/ Feiertag handelt und bildet das Resultat entsprechend auf die Indexmenge $\{0,1,2\}$ ab. Produktionskosten ergeben sich direkt durch die hergestellten Mengen und dem Stückkostensatz $k_{e,m}^{Produktion}$ des jeweiligen Erzeugnisses in Abhängigkeit der genutzten Maschine. Immer dann wenn nicht exakt termingerecht produziert wurde, entstehen je Periode für das betreffende Erzeugnis entweder Lager- oder Verzugskosten. Diese berechnen sich als Produkt der Lager bzw. Verzugsmenge und

⁶³ Auch wenn die Größenordnung der direkten Rüstkosten je nach Unternehmen ggf. kaum die monetäre Größe des Planungsergebnisses beeinflusst, so sind diese zur Bestimmung eines eindeutigen, optimalen Produktionsplans von Bedeutung. Auch bei nicht optimal gelösten Problemen (z. B. aufgrund von Zeitbeschränkungen) hilft deren Berücksichtigung unnötige Rüstvorgänge zu vermeiden.

den ergebnisabhängigen Kostensätzen k_e^{Lager} bzw. k_e^{Verzug} . Wartungskosten $k_m^{Wartung}$ sind die Folge von Wartungsvorgängen die auf jeder Maschine in beliebigen Mikroperioden durchgeführt werden können. Wechselt eine Maschine in einer Mikroperiode das zu produzierende Erzeugnis von e auf e_2 fallen Rüstkosten in Höhe von $k_{e,e_2}^{Rüsten}$ an.

$$\begin{aligned}
K^{H1} = & \sum_{\substack{p \in PH1 \\ m \in M \\ sm \in SM}} SMH1_{p,m,sm}^{bin} * k_{sm,\psi(p)}^{Personal} + \sum_{\substack{e \in E \\ mp \in MP \\ m \in M}} prod_{e,mp,m} * k_{e,m}^{Produktion} \\
& + \sum_{p \in PH1} \sum_{e \in E} (LB_{e,p} * k_e^{Lager} + VM_{e,p} * k_e^{Verzug}) \\
& + \sum_{\substack{mp \in MP \\ m \in M}} \left(WV_{mp,m}^{bin} * k_m^{Wartung} + \sum_{\substack{e,e_2 \in E \\ e \neq e_2}} RVH1_{e,e_2,mp,m}^{iBin} * k_{e,e_2}^{Rüsten} \right)
\end{aligned} \tag{5.11}$$

Die Kosten im zweiten Teilplanungshorizont ergeben sich in ähnlicher Weise, weshalb sich die Erläuterungen auf die Unterschiede bezüglich Formel (5.11) beschränken. Durch die Modellierung der szenarioabhängigen Produktion sind Kosten je alternativer Bedarfsentwicklung zu bestimmen. Darüber hinaus ändert sich die Berechnung der Schichtmodellkosten, welche in diesem Teilhorizont ausschließlich von den gewählten Schichtmodellen der Makroperioden abhängen und daher für alle Maschinen gelten. Aus diesem Grund geht die Anzahl der Maschinen $|M|$ als Faktor mit ein. Da eine detaillierte Reihenfolgeplanung (und damit der Grund für Mikroperioden) entfällt, werden ausschließlich Makroperioden als Entscheidungszeitpunkte betrachtet, sodass sich die Berechnung der Produktions-, Wartungs- und Rüstkosten auf diese beschränkt.

$$\begin{aligned}
K_s^{H2} = & \sum_{\substack{p \in PH2 \\ sm \in SM}} SMH2_{p,s,sm}^{bin} * k_{sm,\psi(p)}^{Personal} * |M| \\
& + \sum_{\substack{e \in E \\ p \in PH2 \\ m \in M}} prod_{e,p,m,s} * k_{e,m}^{Produktion} + \sum_{p \in PH2} \sum_{e \in E} LB_{e,p,s} * k_e^{Lager} \\
& + \sum_{\substack{p \in PH2 \\ m \in M}} \left(WV_{p,m,s}^{bin} * k_m^{Wartung} + \sum_{e \in E} RVH2_{e,p,m,s}^{bin} * k_e^{Rüsten} \right)
\end{aligned} \tag{5.12}$$

Im abschließenden dritten Teilhorizont fokussiert die Berechnung der Kosten auf Schichtmodell-, Lagerbestands- und Produktionskosten. Erstere sind durch die Wahl der

Schichten je Makroperiode bestimmt und über alle Perioden aus P^{H3} zu summieren, wobei die zugehörigen Kostensätze wegen der Periodengröße nicht mehr vom Kalendertag abhängen. Lagerkosten fallen je Periode und in Abhängigkeit des betreffenden Erzeugnisses an. Beide Kostenarten hängen von der Periodengröße ab und werden daher in Summe mit $mult^{H3}$ multipliziert. Produktionskosten ergeben sich bis auf die Vergrößerung des Zeitrasters der Makroperioden gleichartig zu Formel (5.12). Die direkten Wartungs- und Rüstkosten werden je Planungslauf als unveränderliche Konstante angenommen und gehen daher nicht mit in die zu optimierenden Gesamtkosten ein.

$$K_s^{H3} = \left(\sum_{\substack{p \in P^{H3} \\ sm \in SM}} SMH3_{p,s,sm}^{rBin} * k_{sm}^{Personal} * |M| + \sum_{\substack{p \in P^{H3} \\ e \in E}} LB_{e,p,s} * k_e^{Lager} \right) * mult^{H3} + \sum_{\substack{e \in E \\ p \in P^{H3} \\ m \in M}} prod_{e,p,m,s} * k_{e,m}^{Produktion} \quad (5.13)$$

5.2.5 Restriktionen

In diesem Abschnitt werden je Teilplanungshorizont die notwendigen Restriktionen zur Abbildung des Planungsproblems und zur Kopplung der Teilhorizonte des Aggregationschemas vorgestellt. Die Abbildung der Bestandsentwicklung erfolgt durch Formel (5.14). Für jede Makroperiode des ersten Teilplanungshorizonts ergibt sich der Lagerbestand eines beliebigen Erzeugnisses aus dem Lagerbestand der vorherigen Makroperiode abzüglich des aktuellen Bedarfs sowie der zu befriedigenden Verzugsmenge der Vorperiode, zuzüglich der Produktionsmenge aller Mikroperioden der aktuellen Makroperiode. Zur Gewährleistung der Lösbarkeit des Modells können Bedarfe außerdem durch Verzugs Mengen kompensiert werden. Im Fall der ersten Planungsperiode existieren keine vorhergehenden Bestands- oder Fehlmengen, sodass diese als Parameter vorgegeben werden.

$$LB_{e,p} = \begin{cases} LB_e^{Initial}, p = 0 \\ LB_{e,p-1}, \text{sonst} \end{cases} - \begin{cases} VM_e^{Initial}, p = 0 \\ VM_{e,p-1}, \text{sonst} \end{cases} + \sum_{mp \in MP_p} \sum_{m \in M} prod_{e,mp,m} - n_{e,p}^{Bedarf} + VM_{e,p} \quad \begin{matrix} \forall e \in E \\ \forall p \in P^{H1} \end{matrix} \quad (5.14)$$

Die Einhaltung der beschränkten Schichtmodellkapazitäten wird durch Formel (5.15) gewährleistet. Während Rüst- oder Wartungsvorgänge durchgeführt werden kann keine Produktion stattfinden. Für jede Makroperiode aus P^{H1} muss daher je Maschine die durch Produktions-, Rüst- und Wartungsvorgänge beanspruchte Kapazität kleiner gleich der verfügbaren Kapazität des auf Maschinenebene gewählten Schichtmodells sein. Produktionsgebundene Kapazität resultiert als Produkt einer hergestellten Menge eines Erzeugnisses sowie der Taktzeit der gewählten Maschine und ist über alle Mikroperioden der aktuellen Makroperiode zu kumulieren. Der Kapazitätsbedarf der Rüstvorgänge derselben Mikroperioden ist je Vorgang durch die Reihenfolge des Produktionswechsels definiert und wiederum aufzusummieren. Wartungsvorgänge beanspruchen ebenfalls Kapazität je Vorgang und sind daher zu summieren, wobei die jeweilige Dauer ausschließlich von der zu wartenden Maschine determiniert wird.

$$\begin{aligned}
& \sum_{mp \in MP_p} \sum_{e \in E} prod_{e,mp,m} * n_{e,m}^{Taktzeit} \\
& + \sum_{mp \in MP_p} \sum_{\substack{e, e_2 \in E \\ e \neq e_2}} RVH1_{e, e_2, mp, m}^{iBin} * n_{e, e_2}^{Rüstzeit} \\
& + \sum_{mp \in MP_p} WV_{mp, m}^{bin} * n_m^{Wzeit} \\
& \leq \sum_{sm \in SM} SMH1_{p, m, sm}^{bin} * n_{sm}^{PKapazität}
\end{aligned}
\quad \begin{array}{l} \forall p \in P^{H1} \\ \forall m \in M \end{array} \quad (5.15)$$

Zur korrekten Abbildung der reihenfolgeabhängigen Rüstvorgänge werden die Formeln (5.16) bis einschließlich (5.19) benötigt. Zunächst wird für jede Mikroperiode sichergestellt, dass eine Maschine nur für ein Erzeugnis gerüstet sein kann, wenn dieses auf der betreffenden Maschine auch herstellbar ist. Des Weiteren ist eine Maschine zu einem Zeitpunkt lediglich zur Produktion genau eines Erzeugnisses gerüstet. Die Produktion kann zu einem beliebigen Zeitpunkt auf einer Maschine für ein Erzeugnis nur durchgeführt werden, wenn der entsprechende Rüstzustand vorliegt. Um diese Kopplung des Rüstzustands an die Produktion zu realisieren ist der Parameter $BigM_{e,m}^{Produktion}$ möglichst klein zu wählen, ohne die maximal mögliche Produktionsmenge des Erzeugnisses in einer Mikroperiode einzuschränken. Es gilt: $\forall e \in E: BigM_{e,m}^{Produktion} = \left\lfloor \frac{\max(n_{sm}^{PKapazität})}{n_{e,m}^{Taktzeit}} \right\rfloor$. Abschließend ist der eigentliche Rüstvorgang zu modellieren. Dieser findet genau dann auf einer Maschine statt, wenn diese in der vorherigen Mikroperiode für ein beliebiges Erzeugnis gerüstet war, in der aktuellen jedoch für anderes Erzeugnis

gerüstet ist. Im Fall der ersten Planungsperiode existiert kein vorheriger Rüstzustand, weshalb an dessen Stelle der Parameter des initialen Rüstzustands tritt.

$$RZH1_{e,mp,m}^{bin} \leq bin_{e,m}^{Herstellbar} \quad \begin{array}{l} \forall mp \in MP \\ \forall m \in M \\ \forall e \in E \end{array} \quad (5.16)$$

$$\sum_{e \in E} RZH1_{e,mp,m}^{bin} = 1 \quad \begin{array}{l} \forall mp \in MP \\ \forall m \in M \end{array} \quad (5.17)$$

$$prod_{e,mp,m} \leq BigM_{e,m}^{Produktion} * RZH1_{e,mp,m}^{bin} \quad \begin{array}{l} \forall mp \in MP \\ \forall m \in M \\ \forall e \in E \end{array} \quad (5.18)$$

$$RVH1_{e,e_2,mp,m}^{iBin} \geq \begin{cases} RZ_{e,m}^{Initial}, mp = 0 \\ RZH1_{e,mp-1,m}^{bin}, sonst \end{cases} \quad \begin{array}{l} \forall mp \in MP \\ \forall m \in M \\ + RZH1_{e_2,mp,m}^{bin} - 1 \quad \forall e, e_2 \in E: e \neq e_2 \end{array} \quad (5.19)$$

Die Formeln (5.20) bis einschließlich (5.26) garantieren die Einhaltung der belastungsorientierten Wartungsintervalle. Dazu werden Hilfsvariablen $hv_{mp,m}^{PW}$ eingeführt, welche je Maschine und Mikroperiode die kumulierte Abnutzung seit der letzten Wartung definieren. Im Fall eines Wartungsvorgangs wird der Variablenwert auf null zurückgesetzt und andernfalls durch den Abnutzungszustand der vorherigen Mikroperiode (oder des Initialwerts) und die produktionsbedingte Abnutzung der aktuellen Mikroperiode additiv bestimmt. Es gilt jeweils: $hv_{mp,m}^{PW} = \left(WZ_m^{Initial}, mp = 0 \right. + \sum_{e \in E} prod_{e,mp,m} * \left. n_e^{WFaktor} \right) * (1 - WV_{mp,m}^{bin})$. Aufgrund der multiplikativen Verknüpfung von Entscheidungsvariablen ist die Restriktion zu linearisieren. Dies wird durch weitere Hilfsvariablen $hv_{mp,m}^{LPW}$ erreicht, die nach Ausmultiplikation der Restriktion den nichtlinearen Teil abspalten (5.20). Wird ein Wartungsvorgang in einer Mikroperiode auf einer Maschine durchgeführt, dann entspricht die Hilfsvariable durch (5.21), (5.22) exakt dem abgespaltenen nichtlinearen Ausdruck wodurch $hv_{mp,m}^{PW}$ zurückgesetzt wird und nimmt andernfalls wegen (5.23) keinen Einfluss. Der gegenseitige Ausschluss von zeitgleicher War-

tung und Produktion (5.24) komplettiert in Kombination mit der Beschränkung der Abnutzungszustände (5.25), (5.26) die Modellierung der Wartung.

$$\begin{aligned}
hv_{mp,m}^{PW} = & \begin{cases} WZ_m^{Initial}, mp = 0 \\ hv_{mp-1,m}^{PW}, sonst \end{cases} & \forall mp \in MP \\
& + \sum_{e \in E} prod_{e,mp,m} * n_e^{WFaktor} - hv_{mp,m}^{LPW} & \forall m \in M
\end{aligned} \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned}
hv_{mp,m}^{LPW} - & \begin{cases} WZ_m^{Initial}, mp = 0 \\ hv_{mp-1,m}^{PW}, sonst \end{cases} - \sum_{e \in E} prod_{e,mp,m} * n_e^{WFaktor} & \forall mp \in MP \\
& \leq n_m^{WInt} * (1 - WV_{mp,m}^{bin}) & \forall m \in M
\end{aligned} \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned}
\begin{cases} WZ_m^{Initial}, mp = 0 \\ hv_{mp-1,m}^{PW}, sonst \end{cases} + \sum_{e \in E} prod_{e,mp,m} * n_e^{WFaktor} - hv_{mp,m}^{LPW} & \forall mp \in MP \\
\leq n_m^{WInt} * (1 - WV_{mp,m}^{bin}) & \forall m \in M
\end{aligned} \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned}
hv_{mp,m}^{LPW} \leq n_m^{WInt} * WV_{mp,m}^{bin} & \forall mp \in MP \\
& \forall m \in M
\end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\begin{aligned}
prod_{e,mp,m} \leq BigM_{e,m}^{Produktion} * (1 - WV_{mp,m}^{bin}) & \forall mp \in MP \\
& \forall m \in M \\
& \forall e \in E
\end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned}
hv_{mp,m}^{PW} \leq n_m^{WInt} & \forall mp \in MP \\
& \forall m \in M
\end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned}
PW_m^{min} * n_m^{WInt} * WV_{mp,m}^{bin} \leq & \begin{cases} WZ_m^{Initial}, mp = 0 \\ hv_{mp-1,m}^{PW}, sonst \end{cases} & \forall mp \in MP \\
& \forall m \in M
\end{aligned} \quad (5.26)$$

Für jede Makroperiode aus Teilhorizont eins ist nach Formel (5.27) genau ein Schichtmodell je Maschine zu wählen, welches die zur Verfügung stehende Kapazität begrenzt.

$$\sum_{sm \in SM} SMH1_{p,m,sm}^{bin} = 1 \quad \forall p \in P^{H1} \quad \forall m \in M \quad (5.27)$$

Darüber hinaus ist für jede Makroperiode aus P^{H1} der Lagerbestand aller Erzeugnisse in Summe und unter Berücksichtigung erzeugnisabhängiger Flächen- bzw. Wertfaktoren sowohl mengenmäßig als auch monetär beschränkt.

$$\sum_{e \in E} LB_{e,p} * n_e^{LF} \leq LB^{MaxME} \quad \forall p \in P^{H1} \quad (5.28)$$

$$\sum_{e \in E} LB_{e,p} * n_e^{Erlös} \leq LB^{MaxGE} \quad \forall p \in P^{H1} \quad (5.29)$$

Aufgrund der Analogie der Restriktionen des zweiten Teilhorizonts zu den vorangegangenen, beschränkt sich die Erläuterung auf die wesentlichen Unterschiede. Im Fall der Lagerbilanzgleichungen ergeben sich diese durch die Einführung der szenarioabhängigen Lagerbestands-, Produktions- und Bedarfsmengen sowie dem dadurch möglichen Verzicht der Verzugs-mengenbetrachtung. Es ist zu beachten, dass für die erste Periode aus P^{H2} die aktuellen Bestände jedes Erzeugnisses an den eindeutigen Bestand der Vorperiode gekoppelt werden, während für alle anderen Perioden die szenarioabhängigen Bestandsvariablen maßgeblich sind. Auf diese Weise wird die Antizipation der unsicheren Bedarfsentwicklung ermöglicht, da die Variablen des ersten Teilplanungshorizonts mit jenen des Zweiten (und Dritten) interagieren, um ungünstige Sachverhalte in der Zukunft zu vermeiden und den Gewinn mittelfristig zu maximieren.

$$LB_{e,p,s} = LB_{e,p-1} + \sum_{m \in M} prod_{e,p,m,s} - n_{e,p,s}^{Bedarf} \quad \begin{array}{l} p = |P^{H1}| \\ \forall e \in E \\ \forall s \in S \end{array} \quad (5.30)$$

$$LB_{e,p,s} = LB_{e,p-1,s} + \sum_{m \in M} prod_{e,p,m,s} - n_{e,p,s}^{Bedarf} \quad \begin{array}{l} \forall p \in P^{H2}: p > |P^{H1}| \\ \forall e \in E \\ \forall s \in S \end{array} \quad (5.31)$$

Die Einhaltung der Kapazitäten muss im zweiten Teilhorizont je Szenario gewährleistet werden, da Produktions-, Rüst-, Wartungs- und Schichtmodellentscheidungen in dessen Abhängigkeit getroffen werden. Die Auswahl eines Schichtmodells gilt je Makroperiode und damit für alle Maschinen gleichermaßen. Ferner hängt die Rüstdauer nicht mehr

vom zuletzt hergestellten Erzeugnis ab und die Betrachtung aller Entscheidungsgrößen erfolgt ausschließlich auf Makroperiodenebene.

$$\begin{aligned}
& \sum_{e \in E} prod_{e,p,m,s} * n_{e,m}^{Taktzeit} \\
& + \sum_{e \in E} RVH2_{e,p,m,s}^{bin} * n_e^{Rüstzeit} + WV_{p,m,s}^{bin} * n_m^{Wzeit} \\
& \leq \sum_{sm \in SM} SMH2_{p,s,sm}^{bin} * n_{sm}^{PKapazität}
\end{aligned}
\quad
\begin{aligned}
& \forall p \in P^{H2} \\
& \forall m \in M \\
& \forall s \in S
\end{aligned}
\quad (5.32)$$

Aufgrund des Verzichts von Mikroperioden ergeben sich in Bezug auf die Modellierung der Rüstvorgänge in diesem Teilplanungshorizont neben der Szenarioabhängigkeit einige weitere Unterschiede. Zunächst wird für alle Makroperioden aus P^{H2} festgelegt, dass eine Maschine in einem beliebigen Szenario nur auf ein Erzeugnis gerüstet werden kann, wenn es dort auch herstellbar ist (5.33). Für die erste Periode wird der Rüstzustand aller Maschinen je Erzeugnis und Szenario von der letzten Mikroperiode des ersten Teilplanungshorizonts übertragen und unter Berücksichtigung eines gegebenenfalls aktuell stattfindenden Rüstvorgangs sichergestellt, dass nur bei geeignetem Rüstzustand produziert werden kann (5.34). Die Funktion φ definiert für ein beliebiges Szenario ob die mit erheblicher Komplexitätssteigerung einhergehende Abbildung von Rüstzustandsübertragungen⁶⁴ zwischen Makroperioden erfolgen soll. Dies ist genau dann der Fall, wenn das Gewicht des betreffenden Szenarios den parametrisierten Schwellenwert sw^{LL} übersteigt. Für alle Szenarien mit $\varphi(s) = 0$ ist ab der zweiten Periode des Teilhorizonts und je Maschine ein Rüstvorgang auf Erzeugnis e durchzuführen, wenn Produktion stattfindet (5.35). Im Fall von $\varphi(s) = 1$ kann darüber hinaus produziert werden, wenn der Rüstzustand aus der Vorperiode übertragen wurde (5.36). Ein Rüstzustandsübertrag von Periode $p - 1$ nach p darf je Maschine, Erzeugnis und Szenario jedoch nur erfolgen, wenn der Rüstzustand in der vorherigen Periode hergestellt oder wiederum aus der Vorperiode übertragen wurde (5.37). Ergänzend muss je Maschine, Erzeugnis und Szenario sichergestellt werden, dass bei Rüstzustandsübertragungen von Periode $p - 1$ nach p sowie von p nach $p + 1$ bei einem Rüstvorgang in der aktuellen Periode wieder auf das ursprüngliche Erzeugnis zurückgerüstet werden muss (5.38). Übertragen wird immer genau ein Rüstzustand je Maschine (5.39), welcher in der ersten Periode des Teilhorizonts allerdings fest durch den Rüstzustand am Ende des Vorherigen definiert ist (5.40).

⁶⁴ Die verwendete Grundformulierung stammt aus [SG99] und wurde dort für ein deterministisches CLSP ohne weitergehende Modellelemente definiert.

$$\begin{aligned}
RVH2_{e,p,m,s}^{bin} &\leq bin_{e,m}^{Herstellbar} && \forall p \in P^{H2} \\
&&& \forall m \in M \\
&&& \forall e \in E \\
&&& \forall s \in S
\end{aligned} \tag{5.33}$$

$$\begin{aligned}
prod_{e,p,m,s} &\leq BigM_{e,m}^{Produktion} && p = |P^{H1}| \\
&&& \forall m \in M \\
&&& \forall e \in E \\
&&& \forall s \in S \\
&&& * (RZH1_{e,|MP|-1,m}^{bin} + RVH2_{e,p,m,s}^{bin})
\end{aligned} \tag{5.34}$$

$$\begin{aligned}
prod_{e,p,m,s} &\leq BigM_{e,m}^{Produktion} * RVH2_{e,p,m,s}^{bin} && \forall p \in P^{H2}: p > |P^{H1}| \\
&&& \forall m \in M \\
&&& \forall e \in E \\
&&& \forall s \in S: \varphi(s) = 0
\end{aligned} \tag{5.35}$$

$$\begin{aligned}
prod_{e,p,m,s} &\leq BigM_{e,m}^{Produktion} && \forall p \in P^{H2}: p > |P^{H1}| \\
&&& \forall m \in M \\
&&& \forall e \in E \\
&&& \forall s \in S: \varphi(s) = l \\
&&& * (RZÜ_{e,p,m,s}^{bin} + RVH2_{e,p,m,s}^{bin})
\end{aligned} \tag{5.36}$$

$$\begin{aligned}
RZÜ_{e,p,m,s}^{bin} - RVH2_{e,p-1,m,s}^{bin} - RZÜ_{e,p-1,m,s}^{bin} &\leq 0 && \forall p \in P^{H2}: p > |P^{H1}| \\
&&& \forall m \in M \\
&&& \forall e \in E \\
&&& \forall s \in S: \varphi(s) = l
\end{aligned} \tag{5.37}$$

$$\begin{aligned}
RZÜ_{e,p,m,s}^{bin} + RZÜ_{e,p-1,m,s}^{bin} - RVH2_{e,p-1,m,s}^{bin} &&& \forall p \in P^{H2}: p > |P^{H1}| \\
+ RVH2_{e_2,p-1,m,s}^{bin} &\leq 2 && \forall m \in M \\
&&& \forall e, e_2 \in E: e \neq e_2 \\
&&& \forall s \in S: \varphi(s) = l
\end{aligned} \tag{5.38}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{e \in E} RZÜ_{e,p,m,s}^{bin} &= 1 && \forall p \in P^{H2}: p > |P^{H1}| \\
&&& \forall m \in M \\
&&& \forall s \in S: \varphi(s) = l
\end{aligned} \tag{5.39}$$

$$\begin{aligned}
RZ\ddot{U}_{e,|P^{H1}|,m,s}^{bin} &= RZH1_{e,|MP|-1,m}^{bin} & \forall m \in M \\
& & \forall e \in E \\
& & \forall s \in S: \varphi(s) = I
\end{aligned} \tag{5.40}$$

Wartungsvorgänge können im zweiten Teilplanungshorizont nicht mehr vorzeitig durchgeführt werden, wodurch sich deren Abbildung vereinfacht, da auf das Zurücksetzen von Abnutzungsvariablen⁶⁵ verzichtet werden kann und damit keine Nichtlinearitäten auftreten. Stattdessen wird je Periode aus P^{H2} , Maschine und Szenario der Abnutzungszustand am Ende des ersten Teilplanungshorizonts mit der produktspezifischen Abnutzung durch Produktion in vorangehenden Makroperioden gekoppelt und in Summe durch die um eins erhöhte Anzahl der bisherigen Wartungsvorgänge bzw. der daraus resultierenden Kapazität beschränkt (5.41). Damit zwischen zwei Wartungsvorgängen keine größere kumulierte Abnutzung entsteht als durch das maschinenabhängige Wartungsintervall vorgegeben ist, besteht ebenfalls eine untere Beschränkung durch (5.42).

$$\begin{aligned}
\sum_{p' \in P^{H2}: p' \leq p} prod_{e,p',m,s} * n_e^{WFaktor} + hv_{|MP|-1,m}^{PW} & \forall p \in P^{H2} \\
\leq n_m^{WInt} * \left(1 + \sum_{p' \in P^{H2}: p' \leq p} WV_{p',m,s}^{bin} \right) & \forall m \in M \\
& \forall s \in S
\end{aligned} \tag{5.41}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{p' \in P^{H2}: p' \leq p} prod_{e,p',m,s} * n_e^{WFaktor} + hv_{|MP|-1,m}^{PW} & \forall p \in P^{H2} \\
\geq n_m^{WInt} * \sum_{p' \in P^{H2}: p' \leq p} WV_{p',m,s}^{bin} & \forall m \in M \\
& \forall s \in S
\end{aligned} \tag{5.42}$$

Für jede Makroperiode aus P^{H2} ist in jedem Szenario genau ein Schichtmodell zu wählen, welches die zur Verfügung stehende Kapazität jeder Maschine gleichermaßen begrenzt.

$$\begin{aligned}
\sum_{sm \in SM} SMH2_{p,s,sm}^{bin} &= 1 & \forall p \in P^{H2} \\
& \forall s \in S
\end{aligned} \tag{5.43}$$

Analog zum ersten Teilplanungshorizont gelten sowohl mengenmäßige als auch monetäre Obergrenzen bezüglich Lagerbeständen, die im zweiten Teilplanungshorizont aller-

⁶⁵ Vgl. Formel (5.20) bis (5.23).

dings in jedem betrachteten Szenario einzuhalten sind. Zur Sicherstellung der Lösbarkeit bei kurzfristiger Bedarfsdynamik werden Verzugs Mengen aus der Betrachtung ausgeschlossen.

$$\sum_{e \in E} \left(LB_{e,p,s} - VM_{e,last(p^{H1})} \right) * n_e^{LF} \leq LB^{MaxME} \quad \forall p \in P^{H2} \quad (5.44)$$

$$\forall s \in S$$

$$\sum_{e \in E} \left(LB_{e,p,s} - VM_{e,last(p^{H1})} \right) * n_e^{Erlös} \leq LB^{MaxGE} \quad \forall p \in P^{H2} \quad (5.45)$$

$$\forall s \in S$$

Die Lagerbilanzgleichung je Erzeugnis, Periode aus P^{H3} und Szenario entspricht der Modellierung des zweiten Teilplanungshorizonts mit Ausnahme der szenariounabhängigen Bedarfsmengen. Die Lagerbestands- und Produktionsvariablen müssen trotz der ausschließlichen Betrachtung des erwarteten Bedarfs weiterhin vom Szenario abhängen, da der Bestand eines beliebigen Erzeugnisses am Ende von Periode $last(P^{H2})$ im Allgemeinen nicht in allen Szenarien identisch ist und somit weiterhin situationsgerecht zu planen ist.

$$LB_{e,p,s} = LB_{e,p-1,s} + \sum_{m \in M} prod_{e,p,m,s} - n_{e,p}^{Bedarf} \quad \forall e \in E \quad (5.46)$$

$$\forall p \in P^{H3}$$

$$\forall s \in S$$

Das gewählte Schichtmodell beschränkt ebenfalls im dritten Teilplanungshorizont die verfügbare Kapazität je Maschine und Periode aus P^{H3} , wobei der Parameter $mult^{H3}$ die im Vergleich zum vorherigen Teilplanungshorizont größeren Makroperioden und infolgedessen die höhere Kapazität abbildet (5.47). Es ist zu beachten, dass auf die Planung von Rüst- und Wartungsentscheidungen verzichtet wird und diese soweit möglich als konstanter Kapazitätsbedarf je Makroperiode von der verfügbaren Kapazität des jeweiligen Schichtmodells abgehen⁶⁶. Konsequenterweise existieren auch keine Rüstzustandsvariablen, sodass die Einhaltung der qualitativen Kapazität direkt durch eine entsprechende Einschränkung der jeweiligen Produktionsmengenvariablen sichergestellt wird (5.48).

⁶⁶ Die Berechnung der pauschalen Rüst- und Wartungsdauer je Makroperiode aus P^{H3} erfolgt im Rahmen der Kopplung aufeinanderfolgender Planungszyklen (vgl. Abschnitt 5.3).

$$\begin{aligned}
\sum_{e \in E} prod_{e,p,m,s} * n_{e,m}^{Taktzeit} & \leq mult^{H3} * \sum_{sm \in SM} SMH3_{p,s,sm}^{rBin} & \forall p \in P^{H3} \\
& * \max(n_{sm}^{PKapazität} - n_m^{AvgRZ} - n_m^{AvgWZ}, 0) & \forall m \in M \\
& & \forall s \in S
\end{aligned} \tag{5.47}$$

$$\begin{aligned}
prod_{e,p,m,s} & \leq mult^{H3} * bigM_{e,m}^{Produktion} * bin_{e,m}^{Herstellbar} & \forall e \in E \\
& & \forall p \in P^{H3} \\
& & \forall m \in M \\
& & \forall s \in S
\end{aligned} \tag{5.48}$$

Makroperioden des dritten Teilplanungshorizonts umfassen deutlich größere Zeitspannen als jene des Vorherigen (Wochen statt Tage). Demzufolge findet bei gleicher Anzahl an Schichtmodellen eine erhebliche Aggregation der möglichen Schichtkapazitäten statt, was wiederum zu suboptimalen, produktionsbezogenen Entscheidungen führt, da die Minimierung der Schichtkosten einen wesentlichen Faktor im Rahmen der Gewinnmaximierung darstellt. Die Erhöhung der Schichtmodellanzahl zur Problemlösung führt zu signifikant steigender Komplexität und widerspricht dem Zweck dieses Teilplanungshorizonts (vgl. Abschnitt 5.2.1). Dies gilt ebenfalls für die Einführung von ausschließlich variablen Schichtkosten, da deren Staffelung verloren ginge. Einen zweckmäßigen Kompromiss liefert die Relaxierung der Schichtmodellauswahl für alle Perioden aus P^{H3} , wodurch steigende Kostensätze erhalten bleiben und die Modellkomplexität sogar abnimmt. Damit muss lediglich garantiert werden, dass die maximal in einer Makroperiode zur Verfügung stehende Schichtkapazität eingehalten wird.

$$\begin{aligned}
\sum_{sm \in SM} SMH3_{p,s,sm}^{rBin} & \leq 1 & \forall p \in P^{H3} \\
& & \forall s \in S
\end{aligned} \tag{5.49}$$

Die Berücksichtigung der mengenmäßigen und monetären Bestandsobergrenzen ist gleichartig zu Teilplanungshorizont zwei, wobei die Kontrollpunkte in Form von Makroperioden ein gröberes Raster aufweisen. In Kombination mit zweckmäßig gewählten Grenzen ist die Lösbarkeit durch weit entfernte Perioden kaum beeinträchtigt.

$$\begin{aligned}
\sum_{e \in E} LB_{e,p,s} * n_e^{LF} & \leq LB^{MaxME} & \forall p \in P^{H3} \\
& & \forall s \in S
\end{aligned} \tag{5.50}$$

$$\sum_{e \in E} LB_{e,p,s} * n_e^{Erlös} \leq LB^{MaxGE} \quad \forall p \in P^{H3} \quad (5.51)$$

$$\forall s \in S$$

5.2.6 Bewältigung komplexer Probleminstanzen

Die Berechnung der optimalen Lösung des vorgestellten Modells bleibt trotz Verwendung des zeitbasierten Aggregationsschemas (vgl. Abschnitt 5.2.1) für praxisnahe Probleminstanzen äußerst komplex. Erschwerend kommt hinzu, dass im Rahmen der operativen Planung relativ wenig Rechenzeit zur Verfügung steht, sodass schnell eine gute Lösung gefunden werden muss. Dies wird durch den ausschließlichen Einsatz eines Standardsolvers im Allgemeinen nur bedingt erreicht, weshalb sich die Erläuterung einer problemspezifischen Heuristik nach dem Relax & Fix Prinzip anhand von Abbildung 22 anschließt.

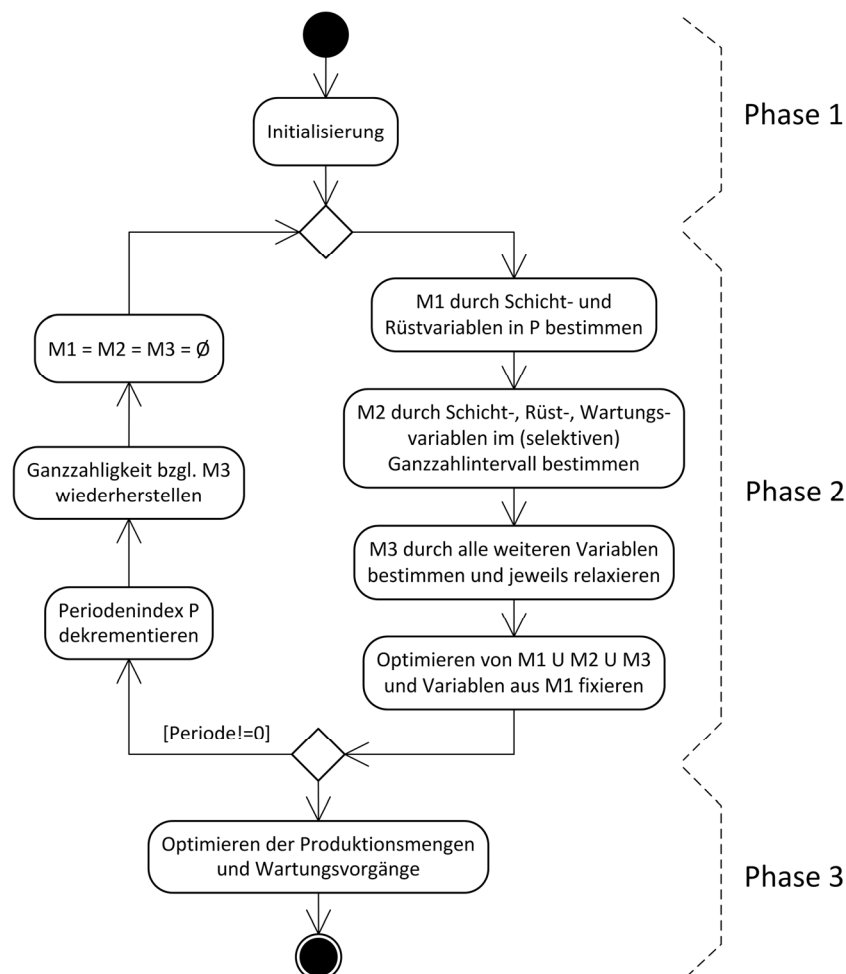


Abbildung 22: Ablauf des Verfahrens zur Generierung einer (Start-) Lösung

Der Verfahrensablauf lässt sich in die drei Phasen der Initialisierung, der iterativen Bestimmung der Schicht- und Rüstvariablenwerte sowie der simultanen Festlegung aller Produktionsmengen und Wartungsvorgänge einteilen. Mit diesem Vorgehen wird das Ziel verfolgt zunächst besonders wichtige Entscheidungen festzulegen, den Lösungsraum jedoch nur in geringem Ausmaß einzuschränken, um auf suboptimale Teilergebnisse flexibel reagieren zu können. Es ist hervorzuheben, dass dabei stets der im Rahmen der Steuerungsaufgabe wichtige Planungshorizont ganzheitlich betrachtet wird.

In der Initialisierungsphase wird zu Beginn das Modell, wie es in Abschnitt 5.2.2 bis 5.2.5 beschrieben ist, für den konkreten Fall des aktuellen Planungszyklus instanziiert. Zur Modellvereinfachung können gegebenenfalls einige Entscheidungsvariablen bereits vorab fixiert werden. Hierbei ist je Periode für jedes Erzeugnis zu prüfen, ob im Verlauf des Planungshorizonts ein spezifischer Bedarf existiert. Ist dies nicht der Fall, werden alle Rüst- und Produktionsvariablen des betreffenden Erzeugnisses ab der entsprechenden Makroperiode auf null fixiert, da die Produktion ausschließlich vor einem Bedarfs-termin stattfinden sollte. Darüber hinaus werden dem Modell auf Grundlage von [PW06, S.122–123] folgende Valid Inequalities hinzugefügt, um die Auswirkung relaxierter Rüstvariablen zu reduzieren:

$$\begin{aligned}
 prod_{e,p,m,s} \leq & \begin{cases} (RVH2_{e,p,m,s}^{bin} + RZ\ddot{U}_{e,p,m,s}^{bin}), \varphi(s) = 1 & \forall m \in M \\ RVH2_{e,p,m,s}^{bin}, \text{sonst} & \forall p \in P^{H2} \end{cases} \\
 & * n_{e,p,s}^{Bedarf} + LB_{e,p,s} & \forall e \in E \\
 & & \forall s \in S
 \end{aligned} \tag{5.52}$$

Die Initialisierung schließt mit der Definition der benötigten Parameter (vgl. Tabelle 9) ab. Diese dienen der folgenden Phase zur Steuerung der Ganzzahligkeitsforderungen sowie zur komplexitätsgerechten Verteilung der Lösungszeit auf die Teilprobleme.

Parameter	Beschreibung
n^{GZ}	Anzahl Perioden mit Beibehaltung der Ganzzahlforderung
n_{sel}^{GZ}	Anzahl Perioden zur selektiven Bestimmung von Ganzzahlvariablen
n^{IP}	Makroperiode, ab der Ganzzahlforderung der Variablen bzgl. MP_0 gilt
GAP_{pk}	Gütebasiertes Abbruchkriterium je Teilproblemklasse pk $pk = 1$: Ganzzahligkeit überwiegend für Variablen bzgl. P^{H2} $pk = 2$: Ganzzahligkeit überwiegend für Variablen bzgl. $P^{H2} + P_0$ $pk = 3$: Ganzzahligkeit überwiegend für Variablen bzgl. P^{H1}

$Zeit_{pk}^{ML}$	Zeitbasiertes Abbruchkriterium bzgl. MIP-Lösungsprozess je pk
$Zeit_{pk}^{SolPol}$	Zeitbasiertes Abbruchkriterium bzgl. Solution Polishing je pk

Tabelle 9: Parameter zur Generierung einer Startlösung

Die zweite Phase bestimmt die Belegung der Rüst- und Schichtvariablen im Planungshorizont. Dazu wird iterativ, ausgehend von der letzten Makroperiode P des zweiten Teilplanungshorizonts vorgegangen. Das zu lösende Teilproblem bzgl. P wird durch Partitionierung aller Variablen in drei disjunkte Teilmengen definiert. Menge M_1 enthält Schicht- und Rüstvariablen welche P zugeordnet sind, deren Ganzzahligkeit erhalten bleibt und deren Belegung in diesem Schritt fixiert wird. Darüber hinaus werden Schicht-, Rüst- und Wartungsvariablen aus den Perioden $[P, \dots, \max(P - n^{GZ}; 0)]$ sowie weitere Schicht- und Rüstvariablen selektiv aus $[P, \dots, \max(P - n_{sel}^{GZ} - 1; 0)]$ der Menge M_2 unter Beibehaltung der Ganzzahligkeitsforderung hinzugefügt, sofern sie nicht bereits in M_1 enthalten sind. Die Belegung der Variablen wird jedoch im Gegensatz zu jenen aus M_1 nicht fixiert. Alle übrigen Variablen gehen relaxiert in Menge M_3 ein und werden ebenfalls nicht fixiert. Die Generierung der Teilprobleme verfolgt damit das Ziel den Fehler infolge relaxierter Variablen zu minimieren, indem die Ganzzahligkeitsforderungen jeweils für einen zusammenhängenden Teilplanungshorizont erhalten bleiben. Um den Lösungsprozess zu beschleunigen, basiert die Selektion bzgl. M_2 auf folgenden Regeln für den Bereich $[P, \dots, \max(P - n_{sel}^{GZ}; 0)]$:

- Ist der Wert einer Schichtmodellvariablen bezüglich $p \in P^{H1} \cup P^{H2}$ in vorheriger Iteration größer null, wird diese aufgenommen
- Ist der Wert einer Rüstvariablen bzgl. P^{H1} in voriger Iteration größer null, wird die Variable sowie jene der vor-/nachgelagerten Mikroperiode aufgenommen
- Existiert ein Bedarf in $p \in P^{H2}$, werden abhängige Rüstvariablen dieser und der zeitlich vorhergehenden Makroperiode aufgenommen

Nach vorgestelltem Ablauf werden die Schicht- und Rüstvariablen im Planungshorizont sukzessive in Richtung Planungszeitpunkt fixiert. Dies hat den Vorteil, dass auf ggf. suboptimale Entscheidungen mit einer Vorverlagerung der Produktion reagiert werden kann und somit die Gefahr von Fehlmengen und unnötig teuren Schichtmodellen reduziert wird. Da dies jedoch nur bis zum Planungszeitpunkt möglich ist verliert der Aspekt mit fortschreitender Fixierung zunehmend an Bedeutung. Um auch weiterhin eine hohe Planungsgüte (insbesondere für die erste Periode) zu erzielen, sind für die letzten Iterationen ab n^{IP} alle Binärvariablen der ersten Makroperiode im Horizont der Menge M_2 hinzuzufügen, sodass die Ganzzahligkeit rechtzeitig Berücksichtigung findet.

Die dritte und letzte Phase der Generierung einer Startlösung besteht aus genau einem Teilproblem, bei dem unter Berücksichtigung der bereits fixierten Schicht- und Rüstvariablen die optimalen Produktionsmengen und Wartungszeitpunkte bestimmt werden. Da diese bereits im vorgelagerten Schritt berücksichtigt wurden steht insgesamt ausreichend Kapazität zur Verfügung. Die Ungenauigkeit infolge der (teilweise) relaxierten Betrachtung führt jedoch dazu, dass dieser Phase neben der Herstellung aller verbleibenden Ganzzahligkeitsforderungen auch die Bedeutung einer abschließenden Korrektur etwaiger Fehlentscheidungen, durch Anpassung der Losgrößen und Wartungszeitpunkte zukommt. Als Endergebnis liegt für jede im Ausgangsmodell vorhandene Binärvariable ein ganzzahliger Wert vor, sodass eine gültige MIP-Start-Lösung definiert ist.

5.3 Integration von Planungsmodell und Szenariogenerator in einen Steuerungsprozess

Die beiden entwickelten Konzepte des mathematischen Planungsmodells und des Szenariogenerators sind in einen Steuerungsprozess zu integrieren, um der im Allgemeinen zeitlich unbegrenzten unternehmerischen Tätigkeit uT und dem dynamischen Planungsumfeld Rechnung zu tragen. Dazu wird die in Abschnitt 2.1.5 beschriebene Methodik der rollierenden Planung problemspezifisch eingesetzt. In jedem Planungszyklus werden die Bedarfe der drei Teilplanungshorizonte ermittelt, welche zusammen als Parameter in das mathematische Modell eingehen. Dieses liefert (unter Verwendung des Verfahrens zur Bewältigung komplexer Probleminstanzen) im Wesentlichen die Belegung der Produktions- und Schichtvariablen, aus denen die umzusetzenden Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen hervorgehen. Anschließend sind die Horizonte zu rollieren, wobei dies bzgl. Teilhorizont drei nur je wechselnder Kalenderwoche KW zutrifft, um ggf. vorhandene Wochenbedarfe nicht anteilig auf tagbasierte Planungsperioden verrechnen zu müssen. Den Ablauf der Steuerung illustriert Abbildung 23.

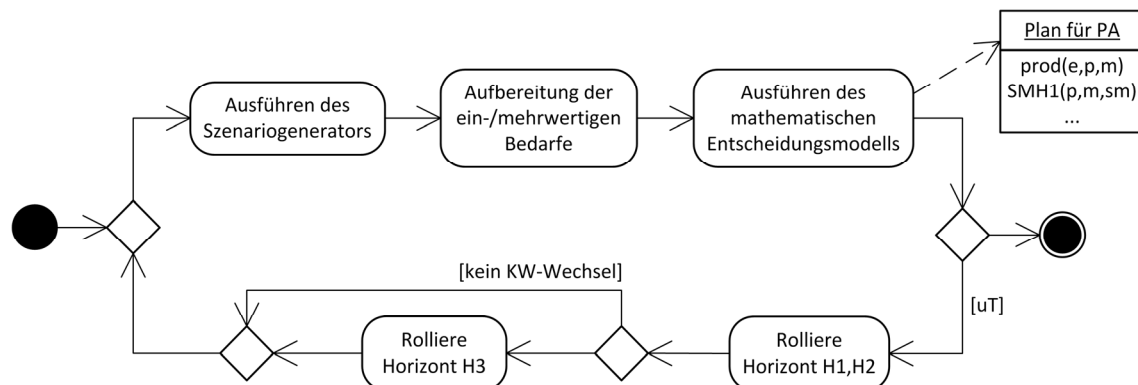


Abbildung 23: Ablauf des entwickelten Steuerungsprozesses

Von zentraler Bedeutung ist die geeignete Kopplung der Planungszyklen, welche sich in der Berechnung der externen Bedarfsparameter und in internen Aspekten des mathematischen Modells niederschlägt. Die bereits verbindlichen Bedarfe folgen jeweils direkt aus den Bestellungen B , deren Liefertermin bezüglich des Planungsdatums noch in der Zukunft, jedoch nicht weiter als $n^{H1} + 1$ Tage entfernt liegt, d. h.:

$$n_{e,p}^{Bedarf} = \sum_{k \in K} \sum_{b \in B_{k,e}} Menge(b) \quad \begin{array}{l} \forall e \in E \\ p \in P^{H1} \end{array} \quad (5.53)$$

Die im Allgemeinen unsicheren Bedarfe bzgl. $p \in P^{H2}$ werden durch das Ergebnis des Szenariogenerators als eine Menge alternativer Bedarfsverläufe $n_{e,p,s}^{Bedarf}$ repräsentiert. Hierbei wird eine Adaption der historischen Bestellcharakteristika sichergestellt, indem sämtliche Analysen auf den kundenseitig aktuellen Bestellinformationen vollständig erneut durchgeführt werden. Dabei ist anzumerken, dass auf die (manuelle) Neubestimmung der Parameterwerte R verzichtet werden kann. Diese sind lediglich im ersten Planungszyklus oder bei Bekanntwerden von signifikant beeinflussenden Sonderereignissen⁶⁷ selektiv festzulegen. In Teilhorizont drei gehen je $p \in P^{H3} \setminus first(P^{H3})$ Bestellungen ein, deren Liefertermin die Kalenderwoche betrifft, welche p ausgehend vom Planungsdatum und unter Berücksichtigung der Periodengrößen zuzuordnen ist. Ein Sonderfall ergibt sich aus der Bedarfsermittlung für $first(P^{H3})$. Hierbei ist je Kunde und Erzeugnis zu unterscheiden ob wochen- oder tagbasierte Bestellinformationen vorliegen. Sei wti der Index des letzten Wochentags ($0 \rightarrow$ Sonntag, ... , $6 \rightarrow$ Samstag) bezüglich Teilhorizont zwei. Bei tagbasierten Daten werden dann nur die Bestellungen betrachtet, deren Termin nicht auf einen der ersten wti Wochentage fällt. Wochenbasierte Bestellmengen werden dagegen um jene Mengen reduziert, welche in den letzten wti Perioden auf Tagesebene angemeldet wurden und aktuell einen Liefertermin aus P^{H2} aufweisen. Darüber hinaus sind je $p \in P^{H3}$ die erwarteten zusätzlichen Bedarfsmengen infolge vorhergesagter Bestelländerungen aus Teilhorizont zwei durch Mittelwertbildung der szenarioabhängigen Bestellalternativen (vgl. Abschnitt 5.1.5) zu berechnen. Die so ermittelten Gesamtperiodenbedarfe gehen anschließend im Sinne des Aggregationschemas (vgl. Abschnitt 5.2.1) als erwartete Bestellmengen in $n_{e,p}^{Bedarf}$ ein.

Im Bereich des mathematischen Entscheidungsmodells sind bei der Kopplung der Planungsläufe drei Aspekte zu berücksichtigen. Zunächst ist ein gültiger Startzustand bezüglich der Rüst-, Wartungs-, Bestands- und Fehlmengensituation zu definieren. Dieser

⁶⁷ Zum Beispiel: Neuer Kunde, neues Erzeugnis, anderer Planer oder geänderte Konfiguration des ERP-Systems auf Kundenseite.

folgt im Allgemeinen aus den betreffenden Variablenbelegungen jener Bezugsperiode BP des letzten Planungszyklus (markiert durch $\hat{}$), deren Index dem um eins verringerten Planabstand PA entspricht⁶⁸. Für $PA \leq n^{H1} + 1$ gilt daher Formel (5.54). In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass auch die Flexibilität der Schichtmodellauswahl durch teilweise Fixierung der Variablen des aktuellen Planungszyklus auf die Werte des Vorherigen eingeschränkt werden kann⁶⁹.

$$\begin{aligned}
LB_e^{Initial} &= \widehat{LB}_{e,BP}, VM_e^{Initial} = \widehat{VM}_{e,BP} && \forall e \in E \\
RZ_{e,m}^{Initial} &= \widehat{RZH1}_{e,mp,m}^{bin} && \forall m \in M \\
WZ_m^{Initial} &= n_m^{WInt} - \widehat{hv}_{mp,m}^{PW} && mp = last(MP_{BP})
\end{aligned} \tag{5.54}$$

Darüber hinaus ist der Multiplikator $mult^{H3}$ der Kostenteilfunktion (5.13) und der Kapazitätsrestriktion (5.47) anzupassen, da mehrfach Planungszyklen durchgeführt werden, bevor der Horizont bezüglich P^{H3} rolliert wird. Das abnehmende Kapazitätsangebot der ersten Periode des dritten Teilhorizonts führt daher zur nachstehenden Berechnungsvorschrift hinsichtlich K_s^{H3} und alternativen Kapazitätsbedingungen für alle Maschinen sowie Szenarien der genannten Periode.

$$\begin{aligned}
K_s^{H3} &= \sum_{p \in P^{H3}} \left(\sum_{sm \in SM} SMH3_{p,s,sm}^{rBin} * k_{sm}^{Personal} * |M| + \sum_{e \in E} LB_{e,p,s} * k_e^{Lager} \right) \\
&* \begin{cases} (mult^{H3} - wti), & p = first(P^{H3}) \\ mult^{H3}, & sonst \end{cases} + \sum_{\substack{e \in E \\ p \in P^{H3} \\ m \in M}} prod_{e,p,m,s} * k_{e,m}^{Produktion}
\end{aligned} \tag{5.55}$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{e \in E} prod_{e,p,m,s} * n_{e,m}^{Taktzeit} \\
&\leq (mult^{H3} - wti) \sum_{sm \in SM} SMH3_{p,s,sm}^{rBin} && p = first(P^{H3}) \\
&\quad \forall m \in M \\
&\quad \forall s \in S \\
&* \max(n_{sm}^{PKapazität} - n_m^{AvgRZeit} - n_m^{AvgWZeit}, 0)
\end{aligned} \tag{5.56}$$

⁶⁸ Je nach Art und Umfang der Betriebsdatenerfassung sind statt Planwerten, die eingetreten Größen zu nutzen. Im Fall des ersten Planungszyklus wird davon ausgegangen, dass die Realwerte bekannt sind.

⁶⁹ Dies ist allerdings maximal für die ersten n^{H1} Perioden direkt möglich. Andernfalls muss die Schichtmodellauswahl für einen größeren Teilhorizont szenariounabhängig (Stufe 1) modelliert werden.

Des Weiteren sind wegen fehlender expliziter Betrachtung der Rüst-, und Wartungsentscheidungen im dritten Teilhorizont entsprechende adaptive Konstanten zu berechnen, welche sich kapazitätsreduzierend auswirken. Sei P^{real} die Menge der letzten n^{AvgP} Perioden bisheriger Planungszyklen deren Planungsergebnisse tatsächlich realisiert wurden, dann lassen sich die Konstanten durch Formel (5.57) und (5.58) definieren.

$$n_m^{AvgRZ} = \left[\frac{1}{n^{AvgP}} \sum_{\substack{p \in P^{real} \\ mp \in MP_p}} \sum_{\substack{e, e_2 \in E \\ e \neq e_2}} RVH1_{e, e_2, mp, m}^{iBin} * n_{e, e_2}^{Rüstzeit} \right] \quad \forall m \in M \quad (5.57)$$

$$n_m^{AvgWZ} = \left[\frac{1}{n^{AvgP}} \sum_{p \in P^{real}} \sum_{mp \in MP_p} WV_{mp, m}^{bin} * n_m^{WZeit} \right] \quad \forall m \in M \quad (5.58)$$

Es ist zu beachten, dass der Parameter n^{AvgP} so groß gewählt werden sollte, dass grundsätzlich von mindestens einem Rüst- bzw. Wartungsvorgang innerhalb des betrachteten Zeitraums ausgegangen werden kann. Sind noch nicht ausreichend Planungszyklen durchgeführt worden (z. B. bei der Einführung des Steuerungsverfahrens), müssen die Konstanten auf Basis von Erfahrungswissen geschätzt werden.

6 Evaluierung

Das entwickelte Konzept zur gewinnmaximierenden Steuerung der Losgrößen-/ Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen wird im folgenden Kapitel evaluiert und auf dessen Eignung bei vorhandener Bedarfsdynamik untersucht. Zu diesem Zweck erfolgt in Abschnitt 6.1 zunächst die detaillierte Spezifikation der verwendeten Datenbasis. Der Fokus liegt allerdings in der durch Abschnitt 6.2 geleisteten Darstellung der Ergebnisse des Verfahrens sowie deren Bewertung.

6.1 Datenbasis

Die Datenbasis lässt sich hinsichtlich des temporalen Aspekts nach Stammdaten und Bewegungsdaten differenzieren. Erstere werden in Abschnitt 6.1.1 festgelegt und gelten für alle Auswertungen der vorgestellten Evaluierung mit folgender Ausnahme. Aufgrund der notwendigen Anzahl an Probleminstanzen zur Auswertung der Ergebnisse unter Verwendung der rollierenden Planung (vgl. Abschnitt 6.2.1) wurde eine überschaubare Problemgröße verwendet. Um dennoch die Leistungsfähigkeit der Modellformulierung und des Lösungsprozesses in Einzeltests aufzuzeigen, wurden die Stammdaten unter weitestgehender Beibehaltung der dargelegten Charakteristika schrittweise erweitert. In Abschnitt 6.1.2 schließt sich die Darstellung der Bewegungsdaten an, wobei insgesamt drei Fälle differenziert werden, welche das mögliche Spektrum der Bedarfsdynamik auswirkungsorientiert abdecken und eine sukzessive Betrachtung ermöglichen.

6.1.1 Stammdaten

Im Rahmen der Definition aller verwendeten Stammdaten lassen sich erzeugnisbezogene, maschinenbezogene sowie schichtbezogene Daten unterscheiden. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit und ohne signifikanten Erkenntnisverlust wird von einem Produktionssystem mit vergleichsweise geringer Komplexität ausgegangen, was der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit zugute kommt. Als Beispiel für einen solchen Fall kann ein Großkunde angeführt werden, dessen bezogenen Erzeugnisse E_0, \dots, E_4 exklusiv auf zwei heterogenen Engpassmaschinen M_0 und M_1 hergestellt werden. Tabelle 10 stellt die zu Grunde gelegten monetären Größen in Abhängigkeit der Erzeugnisse gegenüber.

[GE]	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4
Produktion	19	15	15	10	17
Lagerung	0,25	0,2	0,3	0,175	0,25
Erlös	136	62	150	84	98
Verzug	450	391	458	430	334

Tabelle 10: Stammdaten - Monetäre, erzeugnisbezogene Daten

Die Spezifikation der qualitativen und quantitativen Kapazität der heterogenen Maschinen welche zur Verwendung bereitstehen definiert Tabelle 11. Die Taktzeit ist in Zeiteinheiten je Mengeneinheit angegeben, falls das betreffende Erzeugnis auf der betrachteten Maschine herstellbar ist. Der Wartungsfaktor beschreibt die Abnutzung durch Produktion einer Mengeneinheit des jeweiligen Erzeugnisses und gilt unabhängig von der verwendeten Maschine. Ein Wartungsvorgang dauert jeweils 180 Zeiteinheiten und ist nach frühestens 75 % der maximal möglichen 2500 Abnutzungseinheiten durchzuführen. Direkte Wartungskosten sind zu vernachlässigen.

	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4
Taktzeit M_0 [ZE]	5	6	4	X	4
Taktzeit M_1 [ZE]	7	4	4	5	X
Wartungsfaktor	1	1,2	0,8	1	1,2

Tabelle 11: Stammdaten - Maschinenbezogene Daten

Tabelle 12 legt die Dauer eines Rüstvorgangs in Zeiteinheiten erzeugnisbezogen fest. Es wird angenommen, dass die Rüstzeitmatrix asymmetrisch aufgebaut, die Dreiecksungleichung erfüllt und der Einfluss der Maschine zu vernachlässigen ist. Des Weiteren wurde auf eine Darstellung der reihenfolgeunabhängigen Rüstauern verzichtet, da diese je Erzeugnis e direkt berechnet werden können. Hierzu ist lediglich der Mittelwert aller reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten bezüglich e und allen anderen Elementen aus E zu bestimmen. Direkte Rüstkosten sind zu vernachlässigen.

[ZE]	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4
E_0	-	41	25	38	53
E_1	51	-	44	44	39
E_2	38	34	-	42	29
E_3	32	42	47	-	37
E_4	28	49	30	39	-

Tabelle 12: Stammdaten - Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten der Erzeugnisse

Abschließend sind die (kumulierten) Schichtkapazitäten in Zeiteinheiten und die zugehörigen Kosten in Geldeinheiten durch Tabelle 13 festgelegt. Die Kostengrößen werden hierbei in Abhängigkeit des betreffenden Kalendertags angegeben. Es ist anzumerken, dass die Feststellung des Tages weitestgehend automatisiert erfolgt, indem die Feiertage auf Grundlage der Osterformel (vgl. [Lic97]) berechnet werden.

	Kapazität [ZE]	Kosten [GE]		
		Werktag	Wochenende	Feiertag
Keine Schicht	0	0	0	0
Frühschicht	480	2.000	4.000	6.000
+ Spätschicht	960	4.500	9.000	13.500
+ Nachtschicht	1.440	7.500	15.000	22.500

Tabelle 13: Stammdaten - Schichtbezogene Daten

Die Rüstzeiten im dritten Teilplanungshorizont werden aufgrund des vorhandenen Erfahrungswissens pauschal auf 10 % der verfügbaren Kapazität geschätzt. Eine explizite (und relevante) Beschränkung der Lagerkapazitäten sei nicht gegeben, sodass die Einführung der Lagerfaktoren obsolet wird. Die initialen Lager- und Fehlmengen betragen null Mengeneinheiten. Alle Maschinen wurden unmittelbar vor Planungsbeginn gewartet und auf das erste produktionsfähige Erzeugnis (E_0) gerüstet.

6.1.2 Bewegungsdaten

Bei den relevanten Bewegungsdaten handelt es sich ausschließlich um die historischen, die aktuellen und die zukünftigen Bestellinformationen der Kunden. Es wird davon ausgegangen, dass der betrachtete Großkunde alle bezogenen Erzeugnisse seit mindestens

einem Jahr regelmäßig aber nicht mengen- oder termingleich bestellt. Tagesgenaue Bestellinformationen liegen ausgehend vom jeweiligen Planungszeitpunkt für einen Zeitraum von 21 Tagen vor und werden täglich aktualisiert. Aufgrund der Marktmacht des Kunden bestehen bis auf eine eingefrorene Bedarfszone von zwei Tagen (ab der Heutelinie) keine Beschränkungen hinsichtlich möglicher Bestelländerungen. Des Weiteren sei keine Abhängigkeit der Bestellschwankungen in Bezug auf die Perioden des zweiten Teilplanungshorizonts gegeben. Zur differenzierten Bewertung des entwickelten Verfahrens sollen drei spezifische, kundenseitige Verhaltensweisen durch entsprechende Bestelldaten zur Verfügung gestellt werden. Abbildung 24 visualisiert die Klassifikation der ausgewählten Fälle in Bezug auf das resultierende Risiko des Lieferanten.

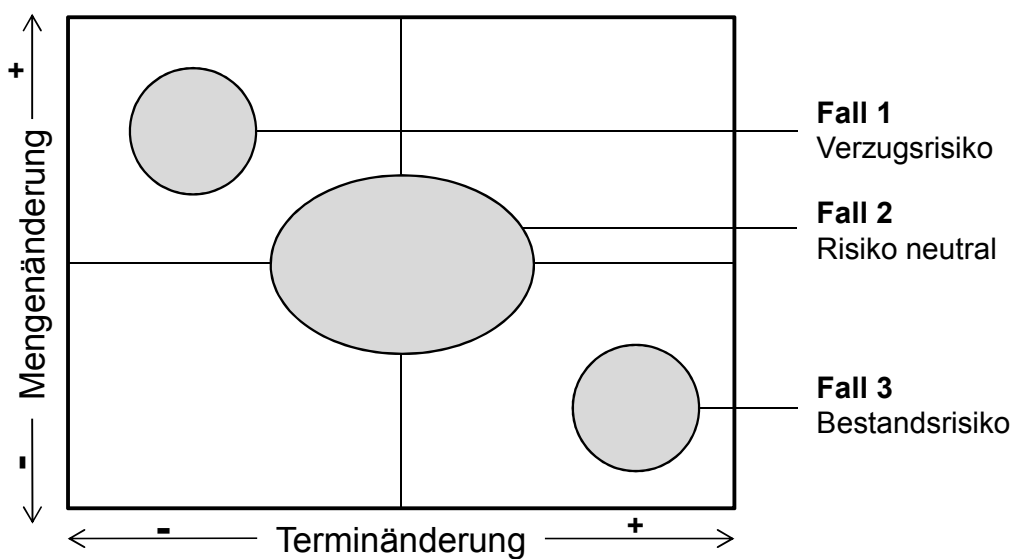


Abbildung 24: Klassifikation der evaluierten Bewegungsdaten

Der erste Fall beschreibt die Situation, dass der Kunde häufig bereits angemeldete Bestellungen relativ spät derart anpasst, dass die fixierte Bestellmenge deutlich über und der endgültige Bestelltermin deutlich vor den bisher angemeldeten Daten liegen. Damit muss in kürzerer Zeit als erwartet eine erhöhte Menge produziert werden, was aufgrund beschränkter Ressourcen zu einem Verzugsrisiko führt. Analog stellt sich die Situation in Fall drei dar, wobei aus den Bestellanpassungen oftmals eine reduzierte Menge und ein späteres Datum hervorgehen. Als Konsequenz ergibt sich ein entsprechendes Bestandsrisiko. In beiden Konstellationen wird davon ausgegangen, dass die künftigen Bestellanpassungen der Erzeugnisse E_0 und E_4 einem bedarfsorientierten Muster folgen. Diese sind in der historischen Datenbasis mit einer ausschließlich mengenbasierten Streuung von maximal 10 % je Periode enthalten. Ergänzend sei ein verbrauchsorientiertes Wochenmuster für E_0 mit vereinzelt bis zu 30 % Mengenstreuung (bzgl. des Be-

stellmengenmittelwerts) angenommen, wobei dem proaktiven Verfahren (soweit nicht anders angegeben) keine Informationen über die Beschaffenheit der Muster vorliegen. Eine besondere Bedeutung kommt dem risikoneutralen Fall zwei zu. Hierbei existieren keine verwendbaren Muster, sodass Bestellschwankungen ausschließlich zufällig erfolgen. Damit soll gezeigt werden, dass auch unter diesen Umständen ein Vorteil durch die Betrachtung alternativer Szenarien erzielt werden kann. Es ist anzumerken, dass grundsätzlich in jedem Fall sowohl positive als auch negative Mengen und Terminänderungen auftreten, die zugehörigen Risikoausprägungen jedoch überwiegen. Historische, nicht musterbasierte Bestellverläufe weisen je Fall die Charakteristik auf, dass der Abruf entweder drei Tage früher mit einer maximalen Mengenerhöhung um 10 %, drei Tage später mit einer maximalen Mengenreduktion um 10 % oder unverändert erfolgte und Korrekturen spätestmöglich bekannt gegeben wurden. Die relativen Häufigkeiten ergeben sich zu $\frac{45}{100}, \frac{45}{100}, \frac{10}{100}$. Diese Datenlage entspricht dem (vereinfachten) praxisnahen Fall, dass Bestellungen zunächst mit geringer Planungsanstrengung angemeldet werden. Rückt der Abruftermin nahe an den Planungszeitpunkt, findet eine Korrektur auf die tatsächliche Menge und den zugehörigen Termin statt, welche meist von den ursprünglichen Informationen abweichen. Für die Dauer der Auswertung wird die dargestellte Situation als zeitinvariant angesehen. Allen Fällen liegen darüber hinaus die in Tabelle 14 abgebildeten künftigen Bestellanmeldungen in Mengeneinheiten zugrunde.

Periode	Erzeugnis 0 [ME]	Erzeugnis 1 [ME]	Erzeugnis 2 [ME]	Erzeugnis 3 [ME]	Erzeugnis 4 [ME]
1	250	0	0	180	200
2	0	0	300	400	0
3	0	100	0	0	0
4	0	100	300	340	175
5	250	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	250	0	0	75
8	0	0	250	0	100
9	250	0	75	500	175
10	0	0	0	0	0
11	500	75	0	100	75
12	0	0	325	425	0
13	0	0	0	100	220
14	0	100	300	0	125

15	250	0	0	0	0
16	0	0	75	0	0
17	200	200	0	0	0
18	0	0	275	300	100
19	0	0	75	0	250
20	0	0	0	0	0
21	100	0	0	180	50
22	0	0	300	0	0
23	0	100	0	0	0
24	0	0	250	160	150
25	175	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0
27	0	100	0	0	275
28	0	0	0	50	0

Tabelle 14: Bewegungsdaten - Künftige Bestellanmeldungen

6.2 Anwendung des Verfahrens und Ergebnisse

Zur Beurteilung der Qualität des entwickelten Verfahrens wurde das Konzept in Form einer prototypischen Steuerungskomponente umgesetzt und um eine notwendige Testumgebung zur Koordination der Bestellverläufe ergänzt. Im Sinne der Nachvollziehbarkeit wird in Abschnitt 6.2.1 der Ablauf der Auswertung inklusive der verwendeten Hard- und Softwaresysteme erläutert. Die Abschnitte 6.2.2 und 6.2.3 liefern untere und obere Schranken zur Einordnung der eigentlichen Ergebnisse aus Abschnitt 6.2.4. Das sich anschließende Fazit komplettiert in Abschnitt 6.2.5 die vorgestellte Evaluierung.

6.2.1 Ablauf der Auswertung

Der Ablauf der Auswertung orientiert sich am maßgeblichen Erfolgskriterium, welches dem realisierten Gewinn aufgrund umgesetzter Steuerungsentscheidungen und abgerufenen Kundenbestellungen entspricht. Infolgedessen wird auf eine sonst übliche Bewertung stochastischer Modellformulierungen (vgl. [BL97, S.137–144]) verzichtet und stattdessen die verwirklichten reaktiven und offline Ergebnisse als Referenzen herangezogen. Weitere Details werden Bezug nehmend zu Abbildung 25 erörtert.

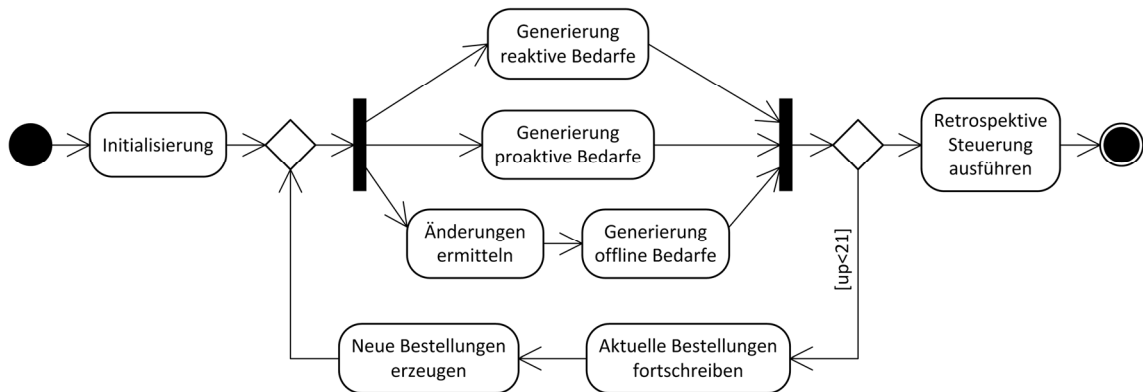


Abbildung 25: Übersicht des Ablaufs der Auswertung

Die Initialisierung definiert die allgemeinen Parameter ($n^{H1} = 1$, $n^{H2} = 8$, $n^{H3} = 9$, $PA = 1$), liest alle bisherigen Bestellinformationen aus und generiert je künftiger Bestellung a priori die zugehörige randomisierte Sequenz von eintretenden Termin-/ Mengenänderungen unter Berücksichtigung der historischen Daten, wobei Verläufe eines Musters nur bzgl. finaler Änderung variieren. In der Ausgangssituation befinden sich bereits Bestellungen am Ende des zweiten Teilplanungshorizonts, sodass die Daten der Perioden 1-13 aus Tabelle 14 Gegenstand der Betrachtung sind. Auf dieser Grundlage werden anschließend die reaktiven, proaktiven und tatsächlichen Bedarfe des Planungshorizonts ermittelt und in je einer Datei gespeichert. Im reaktiven Fall folgen diese unmittelbar aus den aktuell angemeldeten Bestellungen, wohingegen die offline Bedarfe durch die zugehörigen Bestelländerungen bestimmt werden. Das proaktive Vorgehen entspricht den Ausführungen aus Abschnitt 5.1. Im nachfolgenden Schritt werden die aktuell vorhandenen Elemente unter Verwendung der zu Beginn generierten Änderungssequenzen fortgeschrieben und die neu in den Betrachtungshorizont rückenden Bestellungen erzeugt. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis 21 umzusetzende Perioden *up* (3 Wochen) betrachtet wurden und als Ergebnis ebenso viele Bedarfsdateien je Steuerungsverfahren vorliegen. Darauf aufbauend können die eigentlichen Steuerungsprozesse retrospektiv abgearbeitet werden. Der Ablauf entspricht den Ausführungen aus Abschnitt 5.2 - 5.3, wobei an einem Montag begonnen wird, Schichtentscheidungen stets zwei Tage im Voraus unwiderruflich festzulegen sind und alle Teilhorizonte identisch rolliert werden, da ausreichend tagesbasierte Daten vorliegen. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sämtliche Ergebnisse tatsächlich realisiert und nicht lediglich geplant sind. Zur Durchführung der Auswertung wurde ein Java Programm entwickelt, welches die benötigte Datenkommunikation realisiert, die Ablauflogik abbildet und die einzelnen Probleminstanzen generiert. Die Berechnung der Lösungen erfolgt durch Anbindung der IBM® ILOG CPLEX V12.2 x64 Optimierungssoftware. Als Hardware-

plattform dient ein Desktoprechner mit Intel® Core™ i7 950 CPU 3,06 GHz und 6 GB Arbeitsspeicher. Jeder Problem Instanz wird ein Zeitfenster von 180 Sekunden sowie zusätzlichen 90 Sekunden Solution Polishing⁷⁰ zugestanden. Damit ergibt sich für einen vollständigen Vergleich jeweils eine maximale Laufzeit (ohne Overhead und Bedarfsdatengenerierung) von etwa 4 Stunden und 43 Minuten (270s * 21s * 3).

6.2.2 Ergebnisse der klassischen reaktiven Steuerung

Die Bedarfe im Planungshorizont ergeben sich im reaktiven Fall direkt aus den zum betreffenden Steuerungszeitpunkt angemeldeten Kundenbestellungen, sodass auf jede Veränderung der Bestellsituation bei dessen Auftreten mit einer derzeit optimalen Anpassungsentscheidung reagiert wird. Die (mit Ausnahme der Rüstzeit und Wartung) monetären Ergebnisse für dieses Vorgehen auf Basis der definierten Datengrundlage finden sich in Tabelle 15 bis Tabelle 17. Es fällt auf, dass in allen Fällen auf teure Wochenendarbeit in den Perioden 6-7, 13-14, oder 20-21 und mehrfach auf Nachtschichten an Werktagen zurückgegriffen werden musste um kurzfristige Bestellanpassungen zu berücksichtigen. Dennoch konnten Verzugskosten sowohl im entsprechenden Risikofall als auch bei neutralem Risiko nicht verhindert werden. Darüber hinaus ist die zu erwartende Korrelation dargestellter Bewertungsgrößen bezüglich der Bedarfe im Gesamtplanungshorizont der drei Fälle vielfach festzustellen. Dabei ist in Fall 1 von vergleichsweise großem, in Fall 2 von mittlerem und in Fall 3 von niedrigerem einflussnehmendem Gesamtbedarf auszugehen. Die erzielten Gewinne (bzw. Verluste) zeigen außerdem, dass auch im reaktiven Fall die vorzeitige Produktion keine Ausnahme ist, sodass durch resultierende Lagerbestände zumindest suboptimale Puffer aufgebaut werden, welche zum Ausgleich von Bestelländerungen eingesetzt werden können.

Schritt	Schichtkosten	Produktionskosten	Lagerkosten	Verzugskosten	Rüstzeit	Wartung	Gewinn
1	4.000	2.704	39	0	38	-	-6.743
2	4.000	2.784	80	0	0	-	-6.864
3	6.500	3.744	138	0	0	-	-10.382
4	6.500	3.744	195	0	0	-	-10.439
5	9.000	5.575	280	0	54	-	-14.855
6	4.000	2.040	177	0	0	-	57.439

⁷⁰ Als Solution Polishing wird die in CPLEX integrierte, evolutionäre Verbesserungsheuristik bezeichnet, welche insbesondere bei sehr komplexen gemischt ganzzahligen Problemen qualitative Ergebnisse liefert. Für weitergehende Details sei an [Rot07] verwiesen.

7	0	0	177	0	0	-	-177
8	6.500	5.040	254	0	0	-	-11.794
9	9.000	5.354	256	0	53	-	20.796
10	9.000	5.520	198	0	0	-	70.130
11	9.000	5.535	296	0	82	M0	-14.831
12	9.000	6.463	262	0	107	M1	44.589
13	0	0	167	0	0	-	42.463
14	30.000	9.719	52	14.928	104	-	70.745
15	9.500	5.742	16	0	192	-	26.786
16	15.000	9.367	0	54.462	0	-	13.245
17	12.000	7.422	74	0	91	-	-19.496
18	12.000	6.195	105	0	0	M0	8.454
19	12.000	8.840	121	0	114	-	34.587
20	8.000	2.907	84	0	79	-	30.217
21	4.000	1.568	88	0	63	-	6.794

Tabelle 15: Ergebnis der reaktiven Steuerung Fall 1

Schritt	Schichtkosten	Produktionskosten	Lagerkosten	Verzugskosten	Rüstzeit	Wartung	Gewinn
1	4.000	2.704	39	0	38	-	-6.743
2	4.000	2.784	80	0	0	-	-6.864
3	6.500	3.744	138	0	0	-	-10.382
4	6.500	3.744	195	0	0	-	-10.439
5	9.000	5.568	277	0	0	-	-14.845
6	0	0	179	0	0	-	50.889
7	0	0	102	0	0	-	36.858
8	9.500	7.307	183	0	95	-	-10.232
9	12.000	6.900	130	0	44	-	50.116
10	6.500	4.393	202	0	53	-	-11.095
11	9.000	5.860	302	0	42	M0	-15.162
12	9.000	6.627	334	0	29	M1	5.925
13	0	0	163	0	0	-	85.077
14	19.000	4.830	113	23.650	45	-	14.959

15	9.000	5.227	118	0	101	-	28.405
16	12.000	8.100	183	0	44	-	1.385
17	15.000	8.661	154	0	28	-	58.227
18	9.000	6.128	231	0	72	-	-8.205
19	15.000	9.307	280	0	57	M0,M1	25.001
20	0	0	280	0	0	-	-280
21	0	0	280	0	0	-	-280

Tabelle 16: Ergebnis der reaktiven Steuerung Fall 2

Schritt	Schichtkosten	Produktionskosten	Lagerkosten	Verzugskosten	Rüstzeit	Wartung	Gewinn
1	4.000	2.704	39	0	38	-	-6.743
2	4.000	2.784	80	0	0	-	-6.864
3	6.500	3.744	138	0	0	-	-10.382
4	6.500	3.744	195	0	0	-	-10.439
5	9.000	5.568	277	0	0	-	-14.845
6	0	0	244	0	0	-	15.464
7	13.000	4.912	247	0	114	-	29.541
8	6.500	4.560	335	0	0	-	-11.395
9	6.500	4.506	291	0	71	-	42.851
10	6.500	4.965	290	0	0	M1	21.845
11	9.000	7.480	396	0	44	-	-16.876
12	9.000	5.235	338	0	0	M0	42.817
13	0	0	338	0	0	-	-338
14	8.000	2.510	249	0	68	-	51.293
15	15.000	8.352	280	0	0	-	17.178
16	6.500	4.484	271	0	25	-	28.453
17	9.000	5.520	277	0	0	-	35.003
18	9.000	5.520	348	0	0	-	196
19	9.000	6.137	344	0	71	-	33.587
20	0	0	184	0	0	-	77.230
21	0	0	184	0	0	-	-184

Tabelle 17: Ergebnis der reaktiven Steuerung Fall 3

6.2.3 Ergebnisse der Offline Planung

Die tatsächlichen Bedarfe im Planungshorizont ergeben sich im offline Fall aus den im Vorhinein korrigierten Bestellanmeldungen bezüglich der endgültigen Mengen und Termine. In jedem Steuerungszeitpunkt wird damit lediglich auf das Rollieren des Horizonts und die entsprechend hinzukommenden, tagesgenauen Bestellanmeldungen sowie aktualisierten Wochenbestellmengen reagiert. Daher wird für das gegebene Modell inklusive der zugehörigen Daten eine optimale Lösung erzielt. Die (mit Ausnahme der Rüstzeit und Wartung) monetären Ergebnisse der betrachteten drei Risikoausprägungen finden sich in Tabelle 18 bis Tabelle 20. Aufgrund der ausbleibenden Bestelländerungen sind vergleichsweise gleichmäßige Schichtkosten in allen drei Fällen zu beobachten, ohne dass Verzugskosten in Kauf genommen werden müssen. Die dazu eingesetzte Kapazität resultiert in keinem Schritt aus Wochenendarbeit und nur zu geringem Umfang aus teuren Schichten an Werktagen. Dies wird im Wesentlichen dadurch erreicht, dass insbesondere in den ersten realisierten Teilplänen eine Produktion vor den Bedarfsterminen stattfindet um im weiteren Verlauf weniger teure Kapazität in Anspruch nehmen zu müssen. Der bereits genannte Zusammenhang zwischen den jeweiligen Bedarfen und Höhe der Bewertungsgrößen gilt auch hier.

Schritt	Schichtkosten	Produktionskosten	Lagerkosten	Verzugskosten	Rüstzeit	Wartung	Gewinn
1	9.000	5.488	80	0	38	-	-14.568
2	9.000	5.568	162	0	0	-	-14.730
3	9.000	5.521	245	0	53	-	-14.766
4	9.500	7.080	352	0	0	-	-16.932
5	6.500	3.960	416	0	0	-	-10.876
6	0	0	282	0	0	-	63.374
7	0	0	282	0	0	-	-282
8	12.000	7.275	394	0	0	M0	-19.669
9	9.000	6.509	418	0	72	-	19.479
10	15.000	9.847	402	0	82	M1	59.599
11	9.000	7.248	522	0	0	-	-16.770
12	9.000	6.423	488	0	76	-	44.403
13	0	0	393	0	0	-	42.237
14	0	0	126	0	0	-	125.318
15	15.000	8.352	143	0	0	-	18.549
16	9.500	6.432	57	0	0	-	76.086

17	9.000	5.031	136	0	100	M0	-14.167
18	15.000	11.266	261	0	62	-	227
19	9.000	6.698	224	0	44	-	39.626
20	0	0	148	0	0	-	41.060
21	0	0	123	0	0	-	12.327

Tabelle 18: Ergebnis der offline Steuerung Fall 1

Schritt	Schicht- kosten	Produktions- kosten	Lager- kosten	Verzugs- kosten	Rüstzeit	War- tung	Gewinn
1	6.500	3.664	56	0	38	-	-10.220
2	6.500	3.744	114	0	0	-	-10.358
3	9.500	4.704	188	0	0	-	-14.392
4	9.500	4.704	263	0	0	-	-14.467
5	6.500	4.396	325	0	95	-	-11.221
6	0	0	227	0	0	-	50.841
7	0	0	150	0	0	-	36.810
8	9.000	7.646	236	0	0	-	-10.124
9	6.500	4.965	143	0	0	M1	57.538
10	9.000	6.650	241	0	44	-	-15.891
11	12.000	5.993	340	0	30	M0	-18.333
12	9.000	5.520	375	0	0	-	6.991
13	0	0	205	0	0	-	85.035
14	0	0	66	0	0	-	62.486
15	12.000	7.320	122	0	0	-	23.308
16	9.000	5.677	155	0	57	-	6.836
17	12.000	7.392	99	0	0	-	62.551
18	12.000	7.822	189	0	86	M1	-12.857
19	12.000	8.388	218	0	0	M0	28.982
20	0	0	218	0	0	-	-218
21	0	0	218	0	0	-	-218

Tabelle 19: Ergebnis der offline Steuerung Fall 2

Schritt	Schichtkosten	Produktionskosten	Lagerkosten	Verzugskosten	Rüstzeit	Wartung	Gewinn
1	4.500	1.840	32	0	38	-	-6.372
2	7.500	2.880	83	0	0	-	-10.463
3	6.500	3.622	147	0	25	-	-10.269
4	6.500	3.720	216	0	0	-	-10.436
5	4.000	2.760	269	0	0	-	-7.029
6	0	0	236	0	0	-	15.472
7	0	0	141	0	0	-	47.559
8	9.000	5.520	246	0	0	-	-14.766
9	9.000	6.213	235	0	71	-	38.700
10	9.000	7.005	264	0	0	M1	17.331
11	6.500	5.512	340	0	28	-	-12.352
12	9.000	6.263	287	0	44	-	41.840
13	0	0	287	0	0	-	-287
14	0	0	152	0	0	-	61.900
15	12.000	6.708	157	0	0	M0	21.945
16	9.000	5.568	157	0	0	-	24.983
17	9.500	6.270	179	0	25	-	33.851
18	9.500	6.484	261	0	29	-	-1.181
19	9.000	5.602	234	0	28	-	34.232
20	0	0	74	0	0	-	77.340
21	0	0	74	0	0	-	-74

Tabelle 20: Ergebnis der offline Steuerung Fall 3

6.2.4 Ergebnisse der entworfenen proaktiven Steuerung

Die zur Steuerung verwendeten Bedarfe im Planungshorizont ergeben sich im proaktiven Fall durch Fortschreibung der zum jeweiligen Zeitpunkt angemeldeten Kundenbestellungen bezüglich des endgültigen Termins und der zugehörigen Menge. Damit sollen potenzielle Veränderungen der Bestellsituation noch vor deren Auftreten zielgerichtet antizipiert und kurzfristige, suboptimale Anpassungsentscheidungen reduziert werden. Die Grundlage der proaktiven Bedarfsermittlung bilden die in den historischen Bestellinformationen vorhandenen bedarf- und verbrauchsorientierten Muster sowie die aus den Daten abgeleiteten Prognosefehlerverteilungen. Es wird angenommen, dass im

verbrauchsorientierten Fall keinerlei Vorabinformationen bereitstehen, sodass zunächst der Parameterwert R hergeleitet werden muss. Das zu diesem Zweck konzipierte heuristische Verfahren liefert für Erzeugnis E_0 mit $ml^{min} = 5$ das in Abbildung 26 (mit Hilfe von JFreeChart) dargestellte Ergebnis. Für die Erzeugnisse E_1 bis E_4 konnten keine charakteristischen Kennlinienverläufe festgestellt werden, weshalb die grafische Ergebnisdarstellung ausbleibt und die entsprechenden Parameterwerte unmittelbar mit Null initialisiert werden.

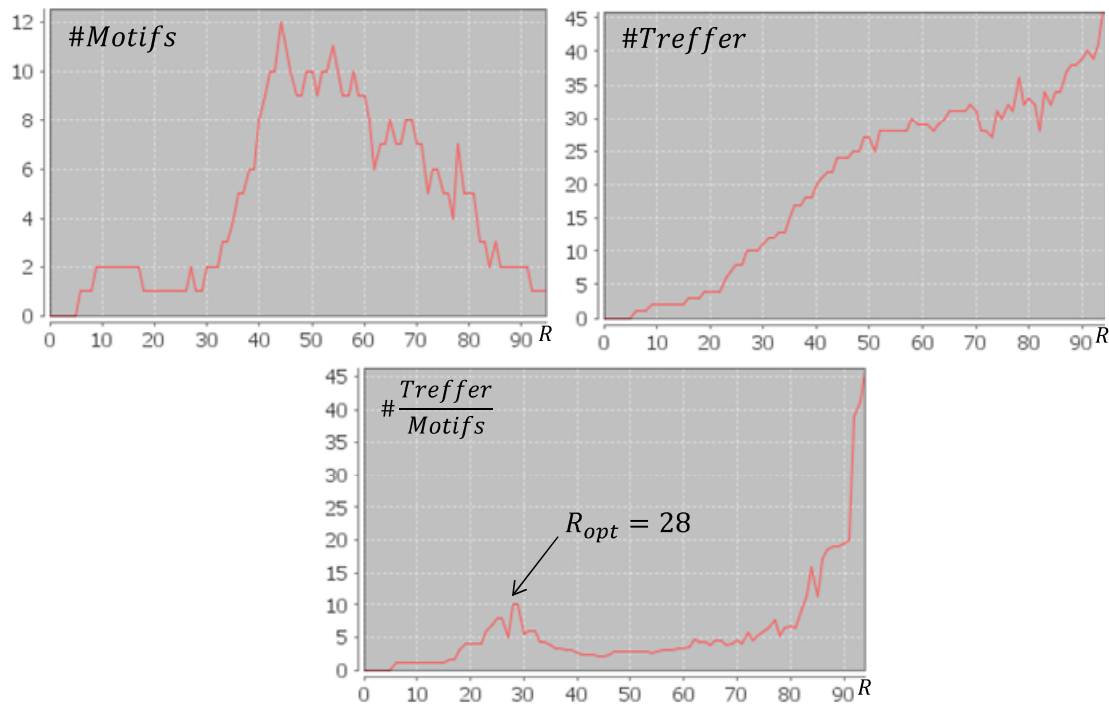


Abbildung 26: Ergebnis der Herleitung von R im verbrauchsorientierten Fall

Für die sich anschließende Mustersuche bezüglich E_0 erfolgt eine Extrapolation des Parameterwerts von der benötigten minimalen Musterlänge bis hin zum angenommenen Maximum von 14 Tagen, indem R jeweils durch $\sqrt{ml * \Delta^2}$ mit $\Delta^2 = \frac{28^2}{5} = 156,8$ bestimmt wird. Für alle anderen Erzeugnisse gilt unabhängig von der betreffenden Musterlänge $R = 0$. Lediglich für die Längen 5-8 von Erzeugnis E_0 wurden auf diese Weise Regelmäßigkeiten in den historischen Abrufen festgestellt. Die nachgelagerte Aufbereitung der gefundenen Motifs identifizierte jedoch alle Objekte als konfliktär, da mindestens eine Instanz der Länge 5 vollständig in allen längeren Motifs der einzigen Konfliktmenge enthalten ist. Das Motif mit Länge 7 erreicht als Einziges eine erhebliche Steigerung der Trefferanzahl zum Vorgänger, sodass zur Konfliktauflösung alle Instanzen der Längen 5,6 und 8 eliminiert werden. Als Ergebnis liegt daher ausschließlich das in Abbildung 27 illustrierte verbrauchsorientierte Muster vor. In diesem Zusammenhang

ist anzumerken, dass jenes Wochenprofil nicht (oder nicht häufig genug) unmittelbar nacheinander abgerufen wurde, um auch konkateniert als Muster zu gelten. Damit steht für den in dieser Evaluierung definierten Prognosehorizont keine verbrauchsorientierte Regelmäßigkeit mit ausreichender Länge zur weiteren Verwendung bereit und die Überführung der Periodenmengen in empirische Häufigkeitsverteilungen wird hinfällig.

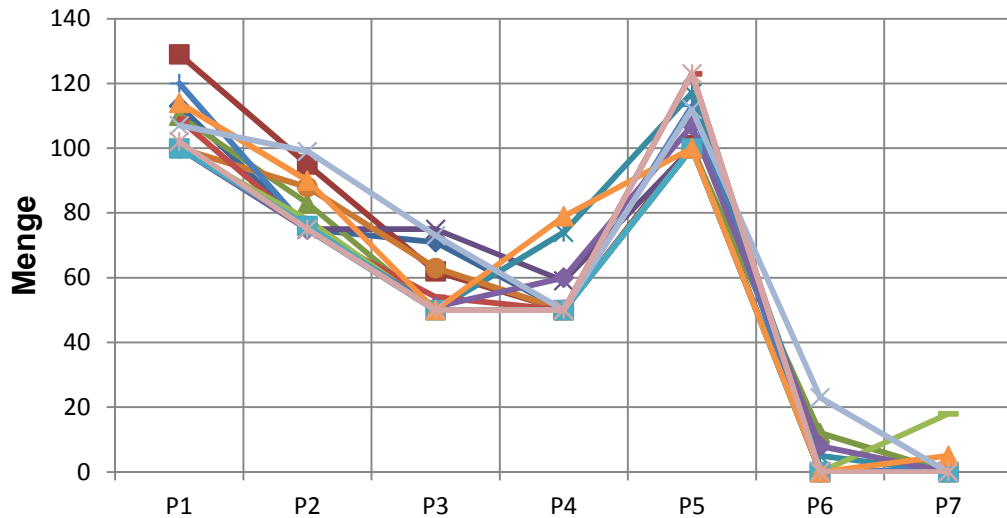


Abbildung 27: Verbrauchsorientiertes Muster der Länge sieben

Im Fall der bedarfsorientierten Bestellfortschreibungen konnten durch Befragung der Prozessverantwortlichen einige Instanzen eines potenziellen Musters identifiziert werden, sodass der zugehörige Parameterwert R für die Mengen- und Termindimension direkt berechnet wird. Vereinfachend sei angenommen, dass die Streuung innerhalb eines Musters unabhängig von dem betrachteten Erzeugnis ist. Damit kann der Erkennungsprozess unmittelbar für alle Erzeugnisse durchgeführt werden. Nach Auflösung der Konfliktmengen liegen zwei Muster BoM_0 , BoM_1 aus vollständigen Bestellreihen vor, welche ausschließlich und identisch für die Erzeugnisse E_0 , E_4 gelten. Der Verlauf von BoM_0 wird mengenmäßig zunächst durch eine starke Zunahme und wenige Abnahmen bis zum Ursprungsniveau beschrieben. Anschließend treten keine Änderungen auf, bis spätestmöglich eine Erhöhung um 20 % (+/- 5 %) erfolgt. In Kombination mit gleichartigen terminmäßigen Änderungen (final -3 Tage) handelt es sich damit um ein verzugsrisikorelevantes Muster. BoM_1 verhält sich konträr und lässt sich als bestandsrisikorelevantes Muster gleichen Ausmaßes charakterisieren. Eine terminbezogene Streuung ist jeweils nicht gegeben. Die relativen Häufigkeitsverteilungen des kundenseitigen Prognosefehlers je Erzeugnis folgen direkt aus den definierten historischen Bewegungsdaten und werden hinsichtlich der Mengendifferenzen durch maximal fünf Klassen definiert. Auf dieser Grundlage erfolgt je Planungszyklus die Ableitung von 10 alternati-

ven Bedarfsentwicklungen, wobei angesichts des vergleichsweise kleinen Anwendungsfalls auf eine zusätzliche Zusammenfassung (und damit Gewichtung) der Szenarien verzichtet wird. Die (mit Ausnahme der Rüstzeit und Wartung) monetären Ergebnisse für dieses Vorgehen finden sich in Tabelle 21 bis Tabelle 23. In den Fällen mit dominierender Risikoart kann durch den erfolgreichen Einsatz von Mustern zur proaktiven Bedarfsermittlung eine direkte Korrektur der kundenseitigen Bestellinformationen und damit die Reduktion der Streuung alternativer Bedarfsentwicklungen erreicht werden. Dies schlägt sich bei Verzugsrisiko in planmäßig erhöhten Produktionsmengen noch vor den angemeldeten Abrufterminen nieder, wobei im Fall des Bestandsrisikos der gegenteilige Effekt erzielt wird. Bei neutralem Risiko wird unter Abwägung der potenziellen künftigen Kosten produziert, sodass aufgrund der ungleichen monetären Auswirkungen von Mehr- und Mindermengen sowie der gegebenen Verteilung von Bestellanpassungen tendenziell erhöhte Bestände aufgebaut werden⁷¹. Als Folge dieser dynamischen Puffer kann in allen drei Fällen mehrfach auf Wochenendarbeit und teure Schichten an Werktagen verzichtet werden ohne Verzugskosten hinnehmen zu müssen. Wiederum gilt auch hier der Zusammenhang zwischen Bedarfsmengen und Höhe der Ergebnisgrößen.

Schritt	Schichtkosten	Produktionskosten	Lagerkosten	Verzugskosten	Rüstzeit	Wartung	Gewinn
1	4.000	2.713	39	0	38	-	-6.752
2	6.500	4.608	104	0	0	-	-11.212
3	9.000	5.584	199	0	54	-	-14.783
4	4.000	2.836	243	0	28	-	-7.079
5	9.000	6.045	350	0	179	-	-15.395
6	0	0	216	0	0	-	63.440
7	0	0	216	0	0	-	-216
8	9.000	5.854	307	0	28	-	-15.161
9	9.000	5.568	306	0	0	-	20.532
10	12.000	6.656	240	0	53	M0	65.952
11	15.000	10.515	409	0	86	M1	-25.924
12	15.000	9.436	425	0	70	-	35.453
13	0	0	330	0	0	-	42.300
14	4.000	890	79	0	42	-	12.0475

⁷¹ Ein exakter Vergleich einzelner Bewertungsgrößen der dargestellten Risikofälle kann hier nicht erfolgen, da jeweils unterschiedliche Bestelländerungen eingetreten sind. Die Berechtigung für diese Datenlage folgt aus dem Bewertungskriterium des entworfenen Steuerungskonzepts, welches den Vergleich zur Reaktiven- und Offlinelösung je Fall in den Vordergrund stellt (vgl. Abschnitt 6.2.5).

15	15.000	9.892	108	0	91	-	17.045
16	15.000	8.867	66	0	127	-	68.141
17	12.000	6.815	167	0	66	M0	-18.982
18	15.000	9.150	246	0	101	-	2.358
19	12.000	8.162	241	0	106	M1	35.145
20	4.000	890	181	0	42	-	36.137
21	4.000	900	171	0	44	-	7.379

Tabelle 21: Ergebnis der proaktiven Steuerung Fall 1

Schritt	Schicht- kosten	Produktions- kosten	Lager- kosten	Verzugs- kosten	Rüstzeit	War- tung	Gewinn
1	4.000	2.704	39	0	38	-	-6.743
2	4.000	2.784	80	0	0	-	-6.864
3	6.500	3.627	148	0	25	-	-10.275
4	6.500	4.708	224	0	76	-	-11.432
5	12.000	6.999	339	0	160	-	-19.338
6	0	0	242	0	0	-	50.826
7	4.000	890	180	0	42	-	31.890
8	9.000	6.640	257	0	44	-	-9.139
9	9.000	6.000	188	0	0	-	53.958
10	15.000	7.111	296	0	53	M0,M1	-22.407
11	12.000	6.263	404	0	99	-	-18.667
12	12.000	8.265	443	0	89	-	1.178
13	0	0	273	0	0	-	84.967
14	0	0	134	0	0	-	62.418
15	12.000	7.193	169	0	67	-	23.388
16	9.000	6.329	209	0	73	-	6.130
17	12.000	7.315	160	0	42	-	62.567
18	12.000	6.740	238	0	97	M0	-11.824
19	12.000	7.867	269	0	85	M1	29.452
20	0	0	269	0	0	-	-269
21	0	0	269	0	0	-	-269

Tabelle 22: Ergebnis der proaktiven Steuerung Fall 2

Schritt	Schichtkosten	Produktionskosten	Lagerkosten	Verzugskosten	Rüstzeit	Wartung	Gewinn
1	4.000	2.704	39	0	38	-	-6.743
2	4.000	2.784	80	0	0	-	-6.864
3	6.500	3.744	138	0	0	-	-10.382
4	4.000	2.671	186	0	25	-	-6.857
5	9.000	5.520	292	0	0	-	-14.812
6	0	0	259	0	0	-	15.449
7	0	0	164	0	0	-	47.536
8	9.000	5.648	257	0	101	-	-14.905
9	9.000	7.035	258	0	44	-	37.855
10	9.000	5.788	282	0	29	-	18.530
11	15.000	7.279	414	0	30	M0,M1	-22.693
12	9.000	7.100	372	0	101	-	40.918
13	0	0	372	0	0	-	-372
14	0	0	237	0	0	-	61.815
15	12.000	6.863	246	0	69	-	21.701
16	12.000	6.198	258	0	105	-	21.252
17	9.000	6.920	272	0	82	-	33.608
18	9.000	6.453	341	0	67	-	-730
19	12.000	6.082	334	0	78	M1	30.652
20	0	0	173	0	0	-	77.241
21	0	0	173	0	0	-	-173

Tabelle 23: Ergebnis der proaktiven Steuerung Fall 3

Zur Auswertung der proaktiven Steuerung wurden Modellinstanzen mit vergleichsweise geringer Komplexität betrachtet. Mit dem Ziel auch bei umfangreicheren Eingabedaten qualitative Entscheidungen zu treffen und damit den Gewinn zu maximieren, wurde ein problemspezifischer Lösungsprozess entwickelt (vgl. Abschnitt 5.2.6). Nachfolgend wird evaluiert, inwieweit die Methode (PLp) im Vergleich zur ausschließlichen Verwendung des Standardsolvers (VdS) zu einer Verbesserung der Lösungsgüte führt. Neben diesem rein quantitativen Vergleich auf Basis des relativen MIP-Gaps⁷² soll außer-

⁷² Der relative MIP-Gap definiert die anteilige Maximaldifferenz zwischen der bisher besten gefundenen Ganzzahllösung und dem Optimum (vgl. [IBM10-ol], Abschnitt „Relative MIP gap tolerance“).

dem verdeutlicht werden, dass der steigenden Komplexität kaum mit einer Erhöhung der Rechenleistung entgegnet werden kann. Aus diesem Grund erfolgt einzig die Berechnung der Referenzlösungen unter Verwendung eines Serversystems mit 24 Kernen (4x Intel® Xeon® CPU X7460 2.66 GHz) und 128 GB Arbeitsspeicher. Die vier beispielhaften Probleminstanzen beschreiben unterschiedliche Umfänge an Maschinen M , Erzeugnissen E und Szenarien S . Die konkreten Eingabeparameter basieren auf der zufälligen Auswahl von Werten aus zweckmäßigen Intervallen. Da jeweils beiden Lösungsmethoden dieselben Datenbasen zur Verfügung gestellt werden bleibt eine genauere Beschreibung aus. Grundsätzlich gilt $n^{H1} = 1$, $n^{H2} = 8$, $n^{H3} = 9$, sowie $n^{GZ} = 2$, $n_{sel}^{GZ} = 4$ und $n^{IP} = 5$. Die Abbruchkriterien wurden den Problemgrößen angepasst und so gewählt, dass sich eine Gesamtlaufzeit von etwa 1200, 1800, 2100 sowie 4000 Sekunden im opportunistischen Modus⁷³ ergibt. Hiervon wurden zur abschließenden Verbesserung der erzielten Startlösung in Fall 1-3 jeweils 120 und in Fall 4 240 Sekunden für Solution Polishing aufgebracht. Um diese interne Methode anzuwenden muss die berechnete Initiaillösung zunächst dem ursprünglichen Modell übergeben werden, sodass damit gleichzeitig deren Gültigkeit festgestellt ist. Die Ergebnisse der spezifizierten Auswertung⁷⁴ finden sich in Abbildung 28, wobei jede Größe dem Mittelwert aus vier identisch durchgeführten Auswertungsläufen entspricht. Alle in Klammern gefassten Resultate kennzeichnen die Zwischenergebnisse vor Anwendung der Verbesserungsheuristik. Für den Fall mit kleinstem Betrachtungsgegenstand führt die Separation des Ausgangsproblems in mehrere einfachere Teilprobleme lediglich zu einer gleichwertigen Lösung, da die Größe des Gesamtproblems noch gut handhabbar ist. Bereits bei verdoppelter Maschinen- und Erzeugnisanzahl wird jedoch ein quantitativer Vorteil von 0,62 % erzielt. In den weiteren Fällen erfolgt eine Vervielfachung der Anzahl alternativer Bedarfsentwicklungen, was sich in einer drastischen Komplexitätssteigerung niederschlägt. Infolgedessen können die Ausgangsprobleme im Gegensatz zu den separierten Teilproblemen nicht mehr zufriedenstellend gelöst werden und es ergibt sich eine erhebliche Reduktion des Gaps um 5,95 % respektive 68,12 %. Dabei handelt es sich nicht lediglich um verbesserte Schranken, sondern um tatsächlich größere Zielfunktionswerte beziehungsweise erwartete Gewinne.

⁷³ In CPLEX sind zwei unterschiedliche, parallele Modi verfügbar. Die opportunistische Variante benötigt weniger Synchronisationszeit und führt daher im Mittel zu einem besseren Ergebnis (vgl. [IBM10-ol], Abschnitt „Determinism of results“).

⁷⁴ Es sei angemerkt, dass die Variablen der letzten beiden Iterationen aus Phase 2 im vorherigen Schritt ($p = 2$) fixiert wurden, da deren Ganzzahligkeit bereits gefordert war.

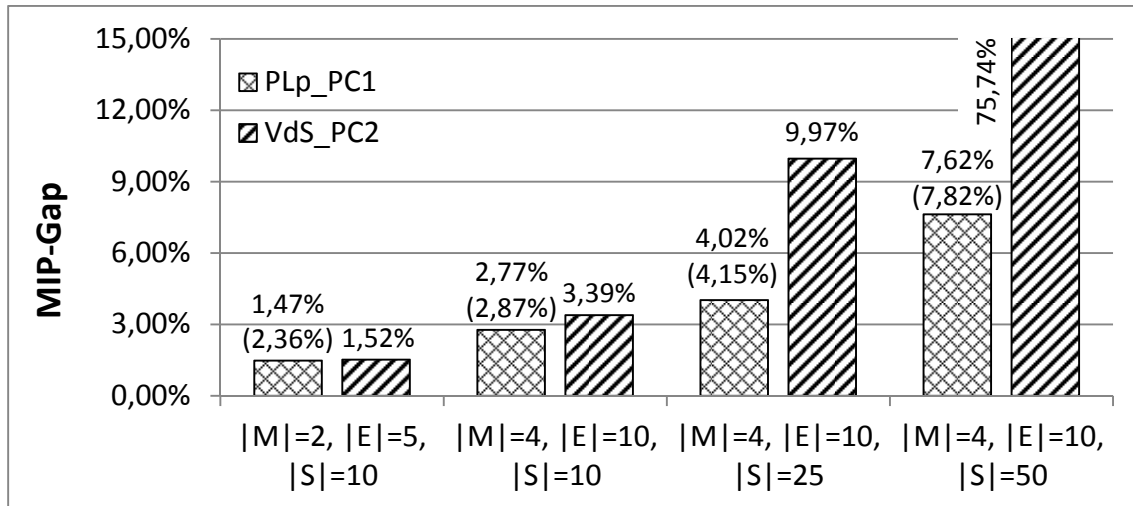


Abbildung 28: Ergebnisse des entwickelten Lösungsprozesses

6.2.5 Fazit

Die zusammenfassende Bewertung der Qualität des entwickelten proaktiven Steuerungskonzepts bedingt einen monetären Vergleich der in den drei betrachteten Risikofällen erzielten Ergebnisse in Relation zu den reaktiven und unerreichbaren offline Pendants. Zur Analyse empfiehlt sich die Verwendung der Periodengewinne, da diese durch alle getroffenen Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen determiniert werden. Um den Unterschied der Verfahren deutlich hervortreten zu lassen werden nicht die absoluten Gewinne im Zeitverlauf, sondern die jeweiligen Abweichungen zum betreffenden optimalen Periodengewinn kumuliert. Abbildung 29 zeigt die unterschiedlichen Ergebnisse der Auswertung bei erhöhtem Verzugsrisiko (Fall 1), neutralem Risiko (Fall 2) und erhöhtem Bestandsrisiko (Fall 3). Es ist festzustellen, dass nach 21 umgesetzten Steuerungsschritten eine signifikante Reduktion der monetären Abweichung zum Optimum erzielt werden konnte. Bezogen auf den Gesamtgewinn handelt es sich um eine Verbesserung in Höhe von $\approx 16,25\%$, $\approx 8,99\%$ und $\approx 1,36\%$. Der unterschiedlich stark ausgeprägte Vorteil steht in direktem Zusammenhang mit dem betreffenden Risikofall. Bei hohem Verzugsrisiko werden angemeldete Bestellungen häufig vorzeitig und mit erhöhter Menge abgerufen, sodass bei reaktiver Steuerung unabhängig vom Kalendertag kurzfristig auf teure Kapazität zurückgegriffen werden muss und dennoch keine bedarfserfüllende Produktion sichergestellt werden kann. Im risikoneutralen Fall gleichen sich Bestelländerungen in gewissem Maße aus, weshalb die Auswirkungen deutlich geringer ausfallen. Häufige Abrufe zu späteren Terminen oder geringerer Menge verursachen bei reaktivem Vorgehen meist lediglich erhöhte Lagerkosten, wodurch proaktiv tendenziell geringe Einsparungen erreicht werden. Der Mehrwert der expliziten

Betrachtung alternativer Bedarfsentwicklungen folgt indirekt durch Fall 2, da die historischen Bestelländerungen so gewählt wurden, dass die erwarteten Abrufe den angemeldeten, noch unsicheren Bestellungen entsprechen. Damit kann die reaktive Steuerung als erwartungswertbasierte Steuerung interpretiert werden. Darüber hinaus ist allgemein anzumerken, dass in den ersten Schritten ein vermeintlicher Vorteil gegenüber dem optimalen Verfahren auftritt. Dieser ist jedoch auf nicht durchgeführte produktionsbezogene Maßnahmen zurückzuführen, deren vorläufige Kosteneinsparungen im weiteren Verlauf wie abgebildet überkompensiert werden.

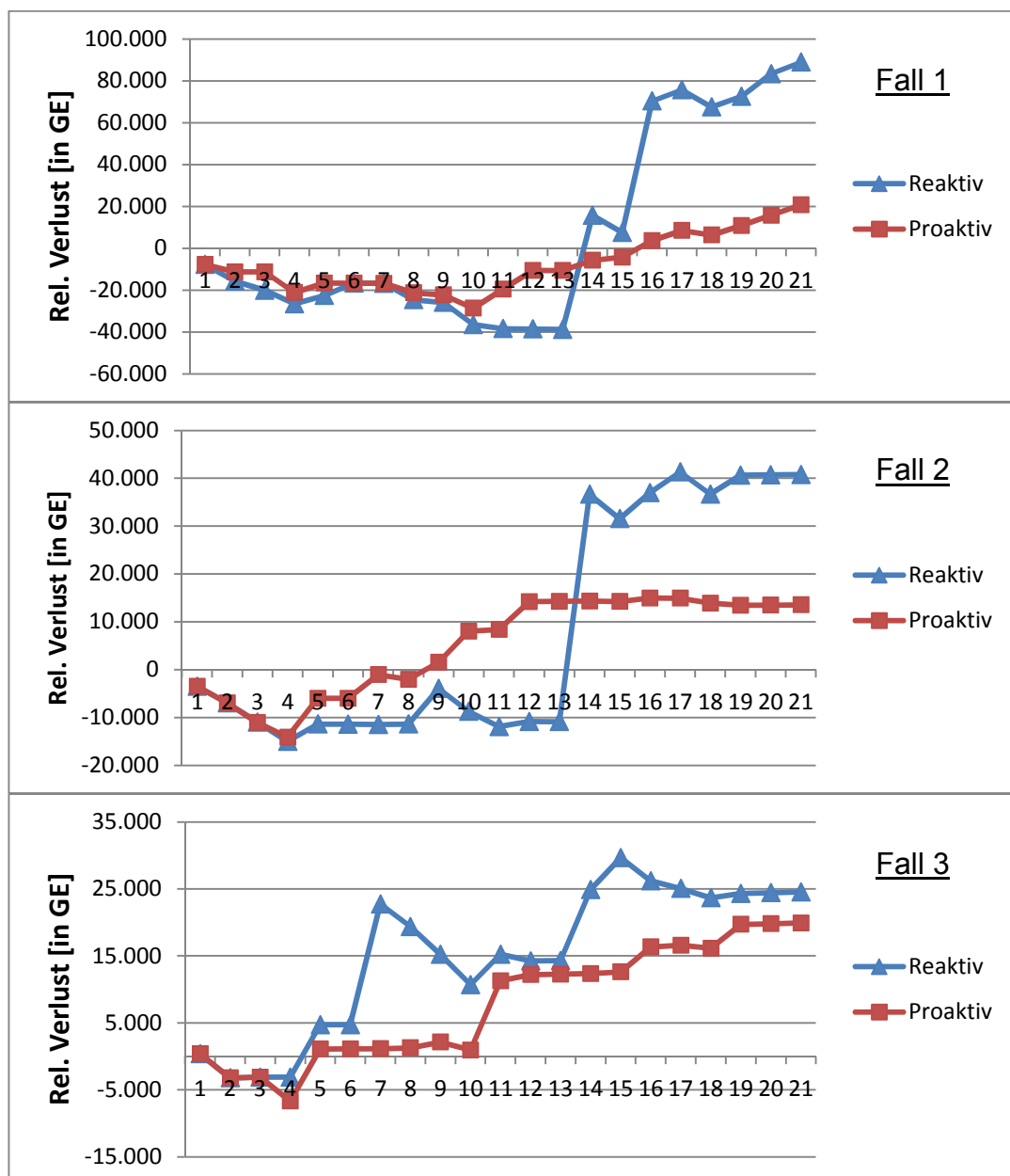


Abbildung 29: Gegenüberstellung der kumulierten reaktiven und proaktiven Ergebnisse im Vergleich zum Offline-Optimum

Die dargestellten monetären Vorteile gehen im Wesentlichen auf den geeigneten Aufbau von Lagerbeständen zurück. Um zu verdeutlichen, dass hierzu keine pauschale deutliche Erhöhung, sondern eine in Höhe und Zeitpunkt situationsbedingte sowie vergleichsweise geringfügige Anhebung bzw. teilweise auch Absenkung der Bestände eingesetzt wird, soll die Entwicklung der Lagermengen im Zeitverlauf an ausgewählten Beispielen aufgezeigt werden. Abbildung 30 zeigt diesen Sachverhalt für zwei unterschiedliche Erzeugnisse. Eine detaillierte Interpretation bleibt aus, da die Bestände in wechselseitiger Abhängigkeit mit den jeweils anderen vier Bestandsverläufen stehen und deren ausführliche Darstellung und Beschreibung unverhältnismäßig erscheint. Hinsichtlich der aggregierten, proaktiven Gesamtlagerkosten ist aus reaktiver Perspektive bei musterbasierten Verzugsrisiko eine Abweichung um +51,8 % (Offline: +84,8 %), bei neutralem Risiko um +21,9 % (Offline: +4,7 %) und bei ebenfalls musterbasiertem Bestandsrisiko um -3,7 % (Offline: -23,8 %) zu konstatieren.

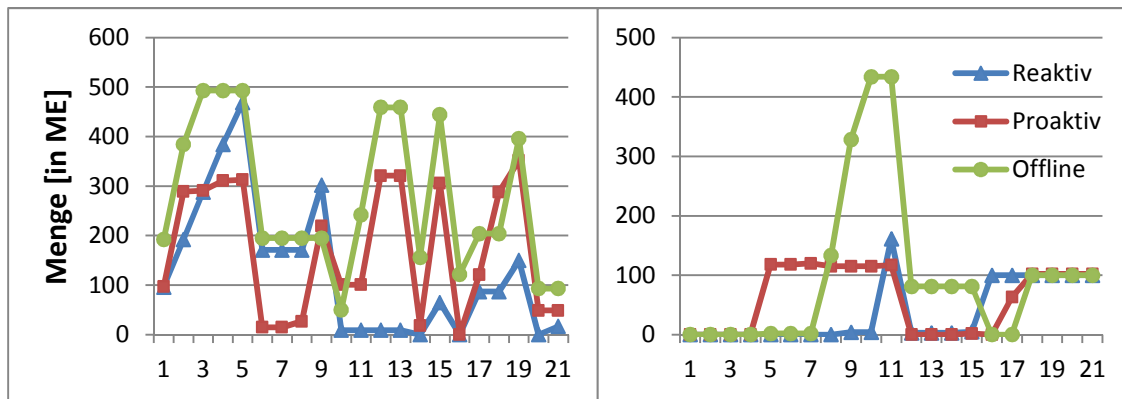


Abbildung 30: Bestandsentwicklung von E0-Fall 1 und E1-Fall 2

Die durchgeführte Auswertung hängt je nach Risikofall unterschiedlich stark von den unter Berücksichtigung der historischen Bestellabweichungen randomisiert generierten künftigen Abweichungen ab. Vor diesem Hintergrund wurden alle Experimente mehrfach wiederholt um auszuschließen, dass es sich bei den dargestellten Ergebnissen lediglich um Ausreißer handelt. Dabei sind in allen drei Fällen sowohl Resultate aufgetreten, die aus Sicht der proaktiven Steuerung deutlich besser als auch schlechter ausfallen. Insbesondere im risikoneutralen Fall wurde eine große Streuung beobachtet. Die schlechteren Ausprägungen zeigten jedoch zum Teil weiterhin einen Vorteil des proaktiven Vorgehens. Für die verbleibenden ungünstigen Fälle konnte zumeist eine Gleichwertigkeit festgestellt werden, da der niedrigere Gewinn auf vermehrte Vorproduktion und damit höhere Lagerendbestände in der letzten betrachteten Periode zurückzuführen ist. Auch wenn sich die Auswertung auf 21 Steuerungsschritte beschränkt, ist von der Fortführung der unternehmerischen Aktivität auszugehen. In Kombination mit der Tat-

sache das Produktion nicht ohne bereits angemeldete Bedarfe erfolgt, muss zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit eine Bewertung der unterschiedlichen Endzustände der Steuerungsverfahren durchgeführt werden. Unter der Annahme, dass lediglich die direkten Produktionskosten und die Schichtkosten soweit wie möglich bereinigt werden, entsprachen diese in Summe etwa der vorliegenden Gewinndifferenz. Es ist anzumerken, dass dieser Aspekt bei den gezeigten Fällen unberücksichtigt bleibt, die Endbestände allerdings gleichwertig oder (bei proaktiver Steuerung) höher sind. Zusammenfassend können die angeführten Ergebnisse als eine Auswahl ausgewerteter Testinstanzen angesehen werden, welche das Potenzial des entwickelten Verfahrens in Abhängigkeit der Risikosituation beispielhaft darlegen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand der Betrachtung ist die gewinnmaximierende Produktionssteuerung, deren Güte aus den monetären Überschüssen umgesetzter Losgrößen-, Reihenfolge- und Kapazitätsentscheidungen bei eingetretenen Kundenabrufen resultiert. Der Erfolg hängt dabei maßgeblich von der Beherrschung der vorliegenden Bedarfsdynamik ab. Im Kontext der Serien- und Sortenfertigung ist die optimale Produktionssteuerung seit Jahrzehnten Gegenstand intensiver Forschung. Steigende Rechenleistung in Kombination mit Fortschritten im Bereich des Operations Research ermöglichen jedoch eine stetige Zunahme der Betrachtungsgenauigkeit. Vor diesem Hintergrund erscheint die rein reaktive Steuerung auf Basis kundenseitiger Bedarfsdaten unzureichend. In dieser Arbeit wird daher ein dreiteiliges Verfahren entwickelt, welches die Bedarfsdynamik der längerfristigen Kunden-Lieferantenbeziehungen analysiert und die gewonnen Erkenntnisse in den Entscheidungsprozess zielführend integriert.

Der erste Teil des Lösungsverfahrens betrifft die Entwicklung eines Szenariogenerators zur situationsbedingten Abbildung der Bedarfsunsicherheit. Zu diesem Zweck werden die historischen Bestellverläufe, auf Kunden-/ Erzeugnisebene aufbereitet und sowohl hinsichtlich bedarfsorientierter als auch verbrauchsorientierter Regelmäßigkeiten untersucht. Das Konzept des Motif Mining wird dazu iterativ eingesetzt, auf die simultane Betrachtung einer Mengen- und Termindimension erweitert sowie um mehrere Nachbearbeitungsschritte ergänzt, um gestreute Muster unterschiedlicher Länge ermitteln zu können. Zur Bestimmung der maximalen Streuung kommt ein neu konzipiertes, methodenspezifisches Vorgehen zum Einsatz, sofern kein ausreichendes Domänenwissen vorhanden ist. Alle unsystematischen Bestellinformationen gehen in planungshorizontbezogene, empirische Prognosefehlerverteilungen ein. Der anschließende Klassifikationsschritt determiniert je Bestellverlauf den Grad der Übereinstimmung bezüglich ermittelter Regelmäßigkeiten, worauf an Hand abgeleiteter Grenzwerte die geeignete muster- oder prognosefehlerbasierte Datenbasis zur Abschätzung der Unsicherheit zugeordnet wird. Die Elemente einer Datenbasis sind grundsätzlich als empirische Häufigkeitsverteilungen abgebildet und dienen der zweckmäßigen Herleitung relevanter Bestellalternativen, indem der Detaillierungsgrad der Selektion an den Gewichten der Bestellmengenintervalle ausgerichtet ist. Abschließend erfolgt die Kombination der situationsabhängig ausgewählten Alternativen je Kunde, Erzeugnis und Periode zu potenziellen Bedarfsverläufen, welche als mehrwertiges Ergebnis in den Steuerungsprozess eingehen.

Im zweiten Teil des entwickelten Verfahrens sind unter Berücksichtigung der Szenarien gewinnmaximierende Produktionsentscheidungen zu treffen. Auf Basis des GLSP wird

hierzu ein mathematisches Optimierungsproblem formuliert, welches das Zielkriterium durch Abbildung von Erlösen, Schicht-, Produktions-, Lagerhaltungs-, Verzugs-, Rüst- und Wartungskosten in Abhängigkeit der Entscheidungsgrößen im Planungshorizont operationalisiert. Darüber hinaus erfolgen zahlreiche praxisnahe Erweiterungen, welche aufgrund des kapazitätswirksamen Charakters Einfluss auf den wirtschaftlichen Aufgabenvollzug ausüben. Im Einzelnen handelt es sich dabei um parallele Maschinen mit spezifischer qualitativer und quantitativer Kapazität, reihenfolgeabhängige Rüstzeiten, maschinen- und belastungsabhängige Wartungsintervalle sowie auf Tages- und Maschinenebene wählbare Schichtmodelle. Durch die zusätzliche Integration der Bedarfsunsicherheit wird die Entscheidung bezüglich deren Antizipation zum Planungsgegenstand und das Risiko vorzeitiger oder aufgeschobener produktionsbezogener Maßnahmen infolge fehlerhafter Prognosen reduziert. Zur Komplexitätsbewältigung ist der Planungshorizont vor dem Hintergrund der rollierenden Planung in drei gekoppelte Teilhorizonte mit abnehmendem Detaillierungsgrad gegliedert. Um das resultierende Modell effizient zu lösen wird ein Verfahren zur Generierung von (Start-) Lösungen nach dem Relax & Fix Prinzip entwickelt, dessen Separationsprozess problemspezifisch angepasst ist.

Der dritte und letzte Teil der Problemlösung integriert den Szenariogenerator und das Planungsmodell in einen Steuerungsprozess und trägt so der im Allgemeinen zeitlich unbegrenzten unternehmerischen Tätigkeit sowie der dynamischen Planungsumgebung Rechnung. Unter Verwendung des Konzepts der rollierenden Planung werden beide entwickelten Komponenten geeignet gekoppelt. Dies umfasst im Wesentlichen die Ermittlung der aktuellen Bedarfe aller drei Teilhorizonte durch vollständige Neuberechnung, die Feststellung des gültigen Startzustands aus den Variablenbelegungen des vorhergehenden Zyklus sowie die Aktualisierung der adaptiven Rüst- und Wartungskonstanten. Das vorgestellte Steuerungskonzept wurde prototypisch implementiert und anhand eines elementaren Anwendungsfalls in Abhängigkeit unterschiedlicher Risikoarten in Bezug auf die Bedarfsunsicherheit evaluiert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass durch die Integration der potenziellen Bedarfsentwicklungen in den Entscheidungsprozess eine signifikante Steigerung des realisierten Gewinns im Vergleich zum rein reaktiven Vorgehen möglich ist. Eine pauschale Erhöhung der Bestände konnte dabei im Sinne einer niedrigen Kapitalbindung vermieden werden. Darüber hinaus zeigt das Verfahren zur effizienten Lösung des Modells insbesondere in den Problem instanzen mit großer Komplexität einen erheblichen Vorteil und trägt damit zur Praxistauglichkeit des Gesamtverfahrens bei.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können als Anknüpfungspunkte für weitere Entwicklungen inner- und außerhalb des gewählten Betrachtungsgegenstandes dienen. Zu Ersterem

lässt sich beispielsweise die Erweiterung der prototypischen Implementierung um benötigte Schnittstellen zur Integration in ein ERP System zählen. Für den produktiven Einsatz wäre es darüber hinaus hilfreich, wenn die notwendigen Parameter des Verfahrens zumindest als Vorschlagswerte automatisiert berechnet werden könnten, da diese erheblichen Einfluss auf die Güte der Steuerungsentscheidungen ausüben. Ein weiterer Aspekt betrifft den Erkennungsprozess von Mustern variabler Länge in Bestellzeitreihen. Genannte Regelmäßigkeiten werden in den Daten zwar identifiziert, eine Verbesserung der Erkennungsrate ist jedoch mittels gesteigerter Untersuchungsgenauigkeit (u. a. im Bereich der Konfliktauflösung) sowie reduziertem Untersuchungsumfang (als Folge spezifischerer Anforderungen eines realen Anwendungsfalls) zu erzielen. Durch den modularen Aufbau des vorgestellten Steuerungskonzepts sind entsprechende Modifikationen leicht möglich. Zusätzliches Potenzial geht von der Erweiterung des Betrachtungsgegenstandes aus, sodass beispielsweise durch Berücksichtigung multipler Produktionsstufen aufeinander abgestimmte Produktionsentscheidungen getroffen werden, welche die Ausrichtung am stufenübergreifenden Optimum sicherstellen. Das entwickelte Verfahren abstrahiert zudem von der beschränkten Verfügbarkeit der Verbrauchsstoffe bzw. setzt eine ausreichende Bevorratung voraus, weshalb die Einbeziehung der Beschaffungsplanung die insgesamt realisierten Gewinne möglicherweise weiter erhöhen kann. Das in diesem Zusammenhang zusätzlich benötigte Modell zur vorausschauenden Produktionsplanung folgt aus der angeführten alternativen Modellierung der Unsicherheit unter Verwendung der bereits ermittelten Szenarien und lässt methodenbedingt eine im Sinne der Beschaffung positive Abnahme der Planungsnervosität erwarten.

8 Literaturverzeichnis

- [Ada98] Adam, D.: Produktions-Management. Gabler, Wiesbaden, 1998.
- [AEO05] Alonso-Ayuso, A.; Escudero, L.; Ortuño, M.: Modeling Production Planning and Scheduling under Uncertainty. In (Wallace, S. W.; Ziemba, W. T. Hrsg.): Applications of stochastic programming. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 2005.
- [Arm01] Armstrong, J. S.: Extrapolation for Time-Series and Cross-Sectional Data: Principles of Forecasting: A Handbook for Reserchers and Practitioners, 2001, S. 217–243.
- [Arn08] Arndt, H.: Supply-Chain-Management. Optimierung logistischer Prozesse. Gabler, Wiesbaden, 2008.
- [Ass76] Assfalg, H.: Lagerhaltungsmodelle für mehrere Produkte. Hain, Meisenheim am Glan, 1976.
- [Bac06] Backhaus, K.: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, Berlin [u.a.], 2006.
- [Bar06] Barthel, H.: Modell zur Analyse und Gestaltung des Bestellverhaltens für die variantenreiche Serienproduktion. Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2006.
- [BEP08] Bonfill, A.; Espuna, A.; Puigjaner, L.: Proactive approach to address the uncertainty in short-term scheduling. In: Computers and Chemical Engineering, 2008, S. 1689–1706.
- [Beu96] Beuermann, G.: Produktionsfaktoren. In (Kern, W.; Schröder, H.; Weber, J. Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. [HWProd]. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1996, S. 1494–1506.
- [BL97] Birge, J. R.; Louveaux, F.: Introduction to stochastic programming. Springer, New York, 1997.
- [Bod05] Boden, M.: Handbuch Personal. Personalmanagement von Arbeitsrecht bis Zeitarbeit. mi-Fachverlag, Landsberg am Lech, 2005.

- [Bog96] Bogaschewsky, R.: Losgröße. In (Kern, W.; Schröder, H.; Weber, J. Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. [HWProd]. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1996, S. 1142–1158.
- [Bra06] Brandimarte, P.: Multi-item capacitated lot-sizing with demand uncertainty. In: International Journal of Production Research, 2006, S. 2997–3022.
- [Bre02] Bretschneider, P.: Ein Beitrag zur Vorhersage musterbasierter nichtlinearer stochastischer Signale. ISLE, Ilmenau, 2002.
- [Bro11] Brodkorb, D.: Two-Level Capacitated Lot Sizing in Production Control to Guarantee Availability, Considering Multidimensional Restrictions. Dissertation, 2011.
- [Brü10] Brüggemann, D.: Ein parametrisierbares Verfahren zur Änderungsplanung für den Flexible Flow Shop mit integrierter Schichtmodellauswahl. Disstertation, 2010.
- [Che05] Chen, J.: Making subsequence time series clustering meaningful. In: Proceedings of the International Conference on Data Mining, 2005, S. 1–8.
- [Cro08] Crone, S.: Neuronale Netze zur Prognose und Disposition im Handel. Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, Wiesbaden, 2008.
- [Cui10] Cui, J.: Medium term planning of a multi-product batch plant under multi-period multi-uncertainty by two-stage stochastic mixed integer linear programming. Shaker, Aachen, 2010.
- [Cut07] Cutaia, M.: Szenariogenerierung in der mehrstufigen stochastischen Optimierung. Dissertation, 2007.
- [Dan09a] Danne, C.: Assessing the Cost of Assortment Complexity in Consumer Goods Supply Chains by Reconfiguration of Inventory and Production Planning Parameters in Response to Assortment Changes. HNI Verlagschriftenreihe, Paderborn, 2009a.
- [Dan09b] Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009b.
- [Dan97] Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung. Springer Verlag, 1997.

-
- [Dav93] Davis, T.: Effevtice Supply Chain Management. In: Sloan Management Review, 1993, S. 35–46.
- [Den05] Denton, A.: Kernel-Density-Based Clustering of Time Series Subsequences Using a Continuous Random- Walk Noise Model. In: Proceeding of the 5th International Conference on Data Mining, 2005, S. 122–129.
- [DD09] Dangelmaier, W.; Degener, B.: Online optimization with discrete lotsizing production and rolling horizons. In: 2nd International Conference on Dynamics in Logistics, S. 37–48.
- [DIN19226] Deutsches Institut für Normung: Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Begriffe und Benennungen, 1968.
- [DS12] Dunn, W. L.; Shultis, J. K.: Exploring Monte Carlo methods. Elsevier/Academic Press, Amsterdam, 2012.
- [DSV97] Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. Springer, Berlin, 1997.
- [FCL05] Fu, T. C.; Chung, R.; Luk, C. M.: Preventing meaningless stock time series pattern discovery by changing perceptually important point detection. In: Lecture Notes in Computer Science, 2005, S. 1171–1174.
- [FD81] Freedman, D.; Diaconis, P.: On the Histogram as a Density Estimator: L2 Theory. In: Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und verwandte Gebiete, 1981.
- [Fle90] Fleischmann, B.: The discrete lot-sizing and scheduling problem. In: European Journal of Operational Research, 1990, S. 337–348.
- [FM97] Fleischmann, B.; Meyr, H.: The general lotsizing and scheduling problem. In: OR Spektrum. Springer-Verlag, 1997, S. 11–21.
- [FMW08] Fleischmann, B.; Meyr, H.; Wagner, M.: Advanced Planning. In (Stadler, H.; Kilger, C. Hrsg.): Supply chain management and advanced planning. Concepts, models, software, and case studies. Springer, Berlin, 2008, S. 81–108.
- [Fox97] Fox, J.: Applied regression analysis, linear models, and related methods. Sage, Thousand Oaks [etc], 1997.

- [Gan09] Gans, J. E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für die variantenreiche Serienprodukte in der Montage. HNI-Verlagsschriftenreihe, 2009.
- [Geb09] Gebhard, M.: Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit. Gabler, Wiesbaden, 2009.
- [GT05] Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. Springer, Berlin ; Heidelberg [etc.], 2005.
- [Gut58] Gutenberg, E.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Betriebswirtschaftl. Verl. Gabler, Wiesbaden, 1958.
- [Hah96] Hahn, D.: Produktionsplanung, strategische. In (Kern, W.; Schröder, H.; Weber, J. Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. [HWProd]. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1996, S. 1522–1534.
- [Has79] Haseborg, F. T.: Optimale Lagerhaltungspolitiken für Ein- und Mehrproduktlager. Strukturen, Algorithmen und Planungshorizonte bei verschiedenen Mengenrabatten und deterministisch schwankendem Bedarf. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1979.
- [HB10] Herbst, G.; Bocklisch, S. F.: Recognition of fuzzy time series patterns using evolving classification results. In: Evolving Systems, 2010, 1, S. 97–110.
- [HN10] Handl, A.; Niermann, S.: Multivariate Analysemethoden. Theorie und Praxis multivariater Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Hol00] Holtze, P.: Data mining in der Bedarfsprognose von Komponenten und Teilen. Neue Ansätze zur Planung einer variantenreichen Serienfertigung. Shaker, Aachen, 2000.
- [IBM10-ol] IBM ILOG: CPLEX Optimization Studio V12.2 Information Center, <http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/cosinfoc/v12r2/index.jsp>, Ab-ruf: 10.05.2012
- [IL09] Ierapetriou, M.; Li, Z.: Modeling and Managing Uncertainty in Process Planning and Scheduling. In: Optimization and Logistics Challenges in the Enterprise. Springer Science+Business Media, 2009, S. 271–285.

-
- [IPH03] Bewertung von Nachfrageschwankungen und logistischer Agilität. Abschlussbericht des Projektes „Dynamik-Monitoring für Zulieferunternehmen (DynaMoZ)“, 2003.
- [Jac06] Jacobsen, A. E.: Messung und Bewertung von Nachfragedynamik und logistischer Agilität in der Automobilzulieferindustrie, 2006.
- [JD08] Jans, R.; Degraeve, Z.: Modeling industrial lot sizing problems: a review. In: *Industrial Journal of Production Research*, 2008, S. 1619–1643.
- [JD88] Jain, A. K.; Dubes, R. C.: *Algorithms for clustering data*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1988.
- [KL05] Keogh, E.; Lin, J.: Clustering of times-series subsequences is meaningless: implications for previous and future research. In: *Knowledge and Information Systems*. Springer-Verlag, London, 2005, S. 154–177.
- [Koc et al.11] Koch, T.; Leövey, H.; Mirkov, R.; Römisch, W.; Wegner-Specht, I.: Szenariogenerierung zur Modellierung der stochastischen Ausspeiselasten in einem Gastransportnetz. In: *VDI-Berichte. Optimierung in der Energiewirtschaft*, 2011, S. 115–125.
- [KS04] Klein, R.; Scholl, A.: *Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*. Vahlen, München, 2004.
- [KS05] Koclar, A.; Süral, H.: A note on "The general lot sizing and scheduling problem". In: *OR Spektrum*, 2005, S. 326–345.
- [KW07] Kaut, M.; Wallace, S. W.: Evaluation of scenario-generation methods for stochastic programming. In: *Pacific Journal of Optimization*, 2007, S. 257–271.
- [KZ04] Keller, S.; Zelewski, S.: *Die Reduzierung des Bullwhip-Effektes. Eine quantitative Analyse aus betriebswirtschaftlicher Perspektive*. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 2004.
- [Las05] Lasch, R.: *Logistik-Management. Innovative Logistikkonzepte*. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 2005.

- [Leh05] Lehmann, T. M.: Handbuch der medizinischen Informatik. Hanser, München, 2005.
- [Les04] Lessing, H.: Prozess zur multivariaten Prognose von Produktionsprogrammen für eine effiziente mehrperiodische Kapazitätsplanung bei typisierten Dienstleistungen Kapazitätsplanung bei typisierten Dienstleistungen. HNI Verlagsschriftenreihe, 2004.
- [Lev02] Levy, G.: Where numerics matter: An introduction to quasi-random numbers. In: Financial Engineering News, 2002.
- [Lew74] Lewandowski, R.: Prognose- und Informationssysteme und ihre Anwendungen. De Gruyter, Berlin [u.a.], 1974.
- [Lew82] Lewis, C. D.: Industrial and business forecasting methods. A practical guide to exponential smoothing and curve fitting. Butterworth Scientific, London, 1982.
- [Lia05] Liao, T.: Clustering of time series data – a survey. In: Pattern Recognition, 2005, S. 1857–1874.
- [Lic97] Lichtenberg, H.: Zur Interpretation der Gaußschen Osterformel und ihrer Ausnahmeregeln. In: Historia Mathematica, 1997, S. 441–444.
- [Lin et al.02] Lin, J.; Keogh, E.; Lonardi, S.; Patel, P.: Finding Motifs in Time Series. In (Hand, D.; Keim, D.; Ng, R. Hrsg.): 2nd Workshop on Temporal Data Mining, 2002, S. 53–68.
- [LS96] Lange, C.; Schaefer, S.: Investitionscontrolling. In (Kern, W.; Schröder, H.; Weber, J. Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. [HWProd]. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1996, S. 785–794.
- [Luc98] Luczak, H.: Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung der Disposition bei Serienfertigern mit schwankenden Bedarfen, 1998.
- [MCB79] McKay, M. D.; Conover, W. J.; Beckman, R. J.: A comparison of three methods for selection values of input variables in the analysis of output from a computer code. In: Technometrics, 1979, S. 239–245.
- [Mey00] Meyr, H.: Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. In: European Journal of Operational Research, 2000, S. 311–326.

-
- [Mey02] Meyr, H.: Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. In: *European Journal of Operational Research*, 2002, S. 277–292.
- [MHW98] Makridakis, S.; Hyndman, R. J.; Wheelwright, S. C.: *Forecasting. Methods and applications*. Wiley, New York [u.a.], 1998.
- [Mis96] Missbauer, H.: Rüst- und Vorbereitungsprozesse. In (Kern, W.; Schröder, H.; Weber, J. Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. [HWProd]. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1996, S. 1806–1815.
- [Mit97] Mitchell, T.: *Machine learning*. McGraw-Hill Publishing Company (ISE Editions), London, 1997.
- [Moe02] Moews, D.: *Kosten- und Leistungsrechnung*. Oldenbourg, München, Wien, 2002.
- [Mue et al.09] Mueen, A.; Keogh, E.; Zhu, Q.; Cash, S.; Westover, B.: Exact Discovery of Time Series Motifs. In: *SDM 2009*, 2009, S. 473–484.
- [Mul et al.06] Mula, J.; Poler, R.; García-Sabater, J.; Lario, F.: Models for production planning under uncertainty: A review: *International Journal of Production Economics*. Elsevier, 2006, S. 271–285.
- [Nad71] Naddor, E.: *Lagerhaltungssysteme*. Deutsch Harri GmbH, Frankfurt (Main), 1971.
- [Neu08] Neuhaus, U.: *Reaktive Planung in der chemischen Industrie. Verfahren zur operativen Plananpassung für Mehrzweckanlagen*. Gabler, Wiesbaden, 2008.
- [NNR11] Nunthanid, P.; Niennattrakul, V.; Ratanamahatana, C. A.: Discovery of Variable Length Time Series Motif. In: *Proceedings of the 8th ECTI*, 2011, S. 472–475.
- [PBK05] Precht, M.; Bachmaier, M.; Kraft, R.: *Angewandte Statistik 1*. Oldenbourg, München [u.a.], 2005.
- [PM97] Petkov, S. B.; Maranas, C. D.: Multiperiod planning and scheduling of multiproduct batch plants under demand uncertainty. In: *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1997, S. 4864–4881.

- [PW06] Pochet, Y.; Wolsey, L. A.: Production planning by mixed integer programming. Springer, Berlin, 2006.
- [RA05] Raa, B.; Aghezzaf, E.: A robust dynamic planning strategy for lot-sizing problems with stochastic demands. In: Journal of Intelligent Manufacturing. Springer Science+Business Media, 2005, S. 207–213.
- [Rie96] Rieper, B.: Lagerhaltungsplanung. In (Kern, W.; Schröder, H.; Weber, J. Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. [HWProd]. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1996, S. 1038–1046.
- [Rot07] Rothberg, E.: An Evolutionary Algorithm for Polishing Mixed Integer Programming Solutions. In: INFORMS JOC, 2007, 19, S. 534–541.
- [RT04] Rombo, S.; Terracina, G.: Discovering Representative Models in Large Time Series Databases. In: Proceedings of the 6th International Conference on Flexible Query Answering Systems, 2004, S. 84–97.
- [Sah04] Sahinidis, N. V.: Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. In: Computers and Chemical Engineering, 2004, S. 971–983.
- [Sch01] Scholl, A.: Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen - Konzepte und Methoden - experimentelle Untersuchungen. Physica-Verl., Heidelberg, 2001.
- [Sch96] Schwinn, R.: Instandhaltung, Modelle zur. In (Kern, W.; Schröder, H.; Weber, J. Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. [HWProd]. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1996, S. 758–785.
- [Sco79] Scott, D. W.: On optimal and data-based histograms. In: Biometrika, 1979, S. 605–610.
- [SG99] Sox, C. R.; Gao, Y.: The capacitated lot sizing problem with setup carry-over. In: IIE Transactions, 1999, 31, S. 173–181.
- [SLV06] Simon, G.; Lee, J. A.; Verleysen, M.: Unfolding preprocessing for meaningful time series clustering. In: Neuronal Networks, 2006, S. 877–888.

-
- [SM06a] Strijbosch, L.; Moors, J.: Modified normal distributions in (R,S)-inventory control. In: *European Journal of Operational Research*, 2006, S. 201–212.
- [SM06b] Suhl, L.; Mellouli, T.: *Optimierungssysteme. Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. Springer, Berlin, 2006.
- [SM97] Sox, C. R.; Muckstadt, J. A.: Optimization-based planning for the stochastic lot-scheduling problem. In: *IIE Transactions*, 1997, S. 349–357.
- [SPP98] Silver, E. A.; Pyke, D. F.; Peterson, R.: *Inventory management and production planning and scheduling*. Wiley, New York, 1998.
- [SPR94] Subrahmanyam, S.; Pekny, J. F.; Reklaitis, G. V.: Design of batch chemical plants under market uncertainty. In: *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1994, S. 2688–2701.
- [SS01] Schlittgen, R.; Streitberg, B.: *Zeitreihenanalyse*. Oldenbourg, München, 2001.
- [Sta02] Stammen-Hegener, C.: *Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei ein- und mehrstufiger Fertigung*. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 2002.
- [Sti01] Stier, W.: *Methoden der Zeitreihenanalyse*. Springer, Berlin, 2001.
- [Sti11] Stiefl, J.: *Wirtschaftsstatistik*. Oldenbourg, R, München, 2011.
- [Sue05] Suerie, C.: *Time continuity in discrete time models. New approaches for production planning in process industries*. Springer, Berlin, 2005.
- [Tat07] Tata, S.: *Declarative Querying For Biological Sequences*. Dissertation, 2007.
- [Tem05] Tempelmeier, H.: *Material-Logistik. Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung und das Supply Chain Management*. Springer, Berlin [u.a.], 2005.
- [Tem07] Tempelmeier, H.: On the stochastic uncapacitated dynamic single-item lotsizing problem with service level constraints. In: *European Journal of Operational Research*, 2007, S. 184–194.

- [Tha97] Thaler, K.: Lieferabrufsystem. In (Bloech, J.; Ihde, G.-B. Hrsg.): Vahlens grosses Logistikleikon. Vahlen, München, 1997, S. 531–533.
- [TIU05] Tanaka, Y.; Iwamoto, K.; Uehara, K.: Discovery of Time-Series Motif from Multi-Dimensional Data Based on MDL Principle. In: Machine Learning, 2005, S. 269–300.
- [TK03] Truppel, W.; Keogh, E.: A Hidden Constraint When Clustering Streaming Time Series. Technical Report, University of California, Riverside, Department of Computer Science and Engineering, 2003.
- [TL08] Tang, H.; Liao, S. S.: Discovering original motifs with different length from time series. In: Knowledge-Based System. Elsevier, 2008, S. 666–671.
- [Tou05] Toutenburg, H.: Induktive Statistik. Eine Einführung mit SPSS für Windows. Springer, Berlin, 2005.
- [VDA4905] Verband der Automobilindustrie: Datenfernübertragung von Lieferabrufen, Frankfurt am Main, 1996.
- [VDA4915] Verband der Automobilindustrie: Datenfernübertragung von Feinabrufen, Frankfurt am Main, 1996.
- [VDA4916] Verband der Automobilindustrie: Datenfernübertragung von produktionsynchronen Abrufen, Frankfurt am Main, 1996.
- [VDA5009] Verband der Automobilindustrie: Forecast-Qualitätskennzahl: Definition und Anwendung, Frankfurt am Main, 2008.
- [VS11] Veldhuijzen, R.; Schip, R. v.: The 2011 Global Supply Chain Agenda, 2011.
- [VV02] Van Landeghem, H.; Vanmaele, H.: Robust planning: a new paradigm for demand chain planning. In: Journal of Operations Management, 2002, S. 769–783.
- [Wan97] Wand, M.: Data-Based Choice of Histogram Bin Width. In: Statistical Computer Graphics, 1997, S. 59–64.

- [WI07] Wu, D.; Ierapetritou, M.: Hierarchical approach for production planning and scheduling under uncertainty. In: Chemical Engineering and Processing. Elsevier, 2007, S. 1129–1140.
- [Zäp01] Zäpfel, G.: Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement. Oldenbourg, München, 2001.