



# Auftragsannahme- und Lagerhaltungsentscheidungen bei auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
„Master of Science (M.Sc.)“ im Studiengang  
Wirtschaftswissenschaft

der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät  
der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

**Robert Matern**

geb. am 7. März 1987 in Tschimkent  
(Matrikel-Nr. 2798160)

**Erstprüfer: Prof. Dr. Stefan Helber**

Hannover, den 11. September 2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	5
1.2 Zielsetzung . . . . .	6
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2 Grundlagen zu auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen</b>	<b>10</b>
2.1 Einordnung in die Produktionswirtschaft und die Begriffsbestimmung	10
2.2 Charakteristika . . . . .	13
2.3 Relevanz für betriebliche Entscheidungen . . . . .	15
<b>3 Das Konzept des Revenue Managements bei der Annahme von Aufträgen</b>	<b>19</b>
3.1 Das Revenue Managements bei der Auftragsannahme . . . . .	19
3.2 Anwendungsvoraussetzungen und Instrumente des Revenue Managements . . . . .	21
3.3 Mathematische Modellformulierung des Revenue Managements . . . . .	23
<b>4 Bestehende Ansätze zur Annahme von Auftragsproduktion und Instandhaltungsprozessen</b>	<b>33</b>
4.1 Review 1 . . . . .	33
4.2 Review 2 . . . . .	33
4.3 Review 3 . . . . .	33
4.4 Review 4 . . . . .	33

---

<b>5 Ein exaktes Lösungsverfahren zur Auftragsannahme- und Lagerhaltungsentscheidung bei auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen</b>	<b>34</b>
5.1 Grundlegendes zum Lösen und Implementieren des Auftragsannahmeproblems . . . . .	34
5.2 Mathematische Formulierung eines Modells zur Auftragsannahme- und Lagerhaltungsentscheidung . . . . .	38
5.3 Numerische Untersuchung . . . . .	45
<b>6 Schlussbemerkung</b>	<b>46</b>
<b>Anhang</b>	<b>47</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>48</b>

# Abkürzungsverzeichnis

APS	Advanced Planning and Scheduling Systeme
ATO	Assemble-to-Order (engl. Begriff für kundenindividuelle Fertigung mit standardisierten Komponenten)
DLP	Deterministisch-lineares Programm
DP	Dynamisches Programm zur Annahme von Aufträgen
DP-storage	Dynamisches Programm zur Annahme von Aufträgen unter Beachtung von Lagerbeständen
GE	Geldeinheiten
MRO	Maintenance-Repair-and-Overhaul (engl. Begriff für Instandhaltungsprozess)
MTO	Make-to-Order (engl. Begriff für Auftragsfertigung)
MTS	Make-to-Stock (engl. Begriff für Lagerfertigung)
OK	Opportunitätskosten
RM	Revenue Management
SCM	Supply Chain Management (engl. Begriff für Wertschöpfungslehre)
u. B. d. R.	unter Berücksichtigung der Randbedingungen

# Symbolverzeichnis

$\mathbf{a}_j$	Vektor des Ressourcenverbrauchs für Produkthanfrage $j$
$a_{hj}$	Verbrauch der Ressource $h$ für Produkthanfrage $j$
$\mathbf{c}$	Vektor der Ressourcenkapazität
$c_h$	Kapazität der Ressource $h$
$D_{jt}$	Aggregierte erwartete Nachfrage nach Produkt $j$ zur Periode $t$
$h$	Ressource aus der Menge $\mathcal{H}$
$\mathcal{H}$	Menge an Ressourcen
$i$	... $\mathcal{I}$
$\mathcal{I}$	Gesamtmenge an möglichen Kombinationen ...
$j$	Produkthanfrage aus der Menge $\mathcal{J}$
$\mathcal{J}$	Menge an möglichen Produkthanfragen
$m$	... Ausführungsmodus aus der Menge $\mathcal{M}_j$
$\mathcal{M}_j$	Menge an produktspezifisch-möglichen Ausführungsmodi für ein Produkt $j$
$\pi_h$	Bid-Preis der Ressource $h$
$p_j(t)$	Wahrscheinlichkeit der Nachfrage nach Produkt $j$ in Periode $t$
$r_j$	Erlös des Produkts $j$
$t$	Periode des Buchungshorizonts $T$
$\tau$	Endperiode $t = 1$ im Buchungshorizont $T$
$T$	Buchungshorizont
$V(\mathbf{c}, t)$	Ertragsfunktion in Abhängigkeit der Kapazitäten $\mathbf{c}$ in der Periode $t$
$x_{jm}$	Anzahl der akzeptierten Anfragen nach Produkt $j$ im Ausführungsmodus $m$

# Abbildungsverzeichnis

1	Grafische Darstellung der Gliederung der Arbeit . . . . .	8
2	Grafische Veranschaulichung eines Wertschöpfungsprozesses . . . .	12
3	Grafische Darstellung des Buchungshorizonts bei der Auftragsfertigung . . . . .	23
4	Beispielhafte Darstellung einer rekursive Folge eines Netzwerk RM .	27
5	Darstellung der Systemzustände des beispielhaften Netzwerk RM .	28
6	Darstellung der Systemzustände des beispielhaften Netzwerk RM (optimaler Auftragseingang) . . . . .	30
7	Darstellung der Systemzustände des Netzwerk RM mit konkurrierenden Anfragen . . . . .	31
8	Rekursive Übergänge der Systemzustände ohne Memofunktion . . .	35
9	Rekursive Übergänge mit Memofunktion . . . . .	36
10	Zusammenhang von Buchungsperioden und den Buchungsabschnitten	40

## Tabellenverzeichnis

1	Ergebnistabelle für das beispielhafte Netzwerk RM . . . . .	29
2	Ergebnistabelle für das beispielhafte Netzwerk RM mit konkurrierenden Anfragen . . . . .	32
3	Optimale Politik für das beispielhafte Netzwerk RM unter Beachtung von Produktanfragen für nachfolgende Buchungsabschnitte . .	44



## Vorwort

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Die Entscheidung über die Annahme von Kundenaufträgen hat weitreichenden Einfluss auf den Ertrag von produzierenden Unternehmen. Einem Unternehmen, dass zusätzlich zur Produktion auch die Instandsetzung ihrer Güter anbietet, steht vor dem Entscheidungsproblem, ob der Auftrag zur Instandsetzung des Gutes wirtschaftlich ist. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden diese Unternehmen als sogenannter Instandhalter bezeichnet. Abhängig des eingehenden Kundenauftrags, indem der Zustand des Gutes beschrieben ist, durch den die notwendigen Prozessschritte zur Instandsetzung des Gutes abgeleitet werden können, generiert der Instandhalter unterschiedliche Erträge. Die Prozessschritte zur Instandsetzung des Gutes geben zusätzlich den notwendigen Ressourcenbedarf für die auszuführende Tätigkeit an, die notwendig sind um das Gut in seinen ursprünglichen bzw. geforderten Zustand zu versetzen. Ressourcen zur Instandsetzung von Gütern können z. B. Material oder Personalstunden sein.<sup>1</sup> Abhängig des möglichen Ertrags und des für den Auftrag notwendigen Ressourcenbedarf muss das produzierende Unternehmen die Entscheidung über Annahme oder Ablehnung des Kundenauftrags treffen. Sofern nur dieser einfache Fall betrachtet wird, bei dem nur der einzelne Kundenauftrag zur Auswahl steht, ist die Entscheidung für den Instandhalter einfach getroffen. Der Kundenauftrag wird angenommen, sofern der Aufwand des Ressourceneinsatzes niedriger als der erzielte Ertrag ist (In dieser Arbeit wird auf eine differenzierte Betrachtung der Herstellkosten verzichtet). Sofern der Unternehmen eine begrenzte Ressourcenkapazität zur Instandsetzung der Güter besitzt, muss zusätzlich der absolute Ressourcenverbrauch des Auftrags für Annahmeentscheidung geprüft werden. Mit Annahme des Auftrags ist ein auftragsbezogener Ertrag erzielt und ein produktbezogener Ressourcenverbrauch eingetreten. Nachdem diese Entscheidung getroffen ist, wird der zeitlich nachfolgende Kundenauftrag betrachtet.

---

<sup>1</sup>Vgl. ... ???

Für die Entscheidung über die Annahme oder Ablehnung eines Kundenauftrags (KA) zur Instandhaltung von Gütern bedarf es einer umfassenderen Betrachtung, als nur die kurzsichtige Entscheidung über die Annahme einzelner Aufträge. Angenommen ein Instandhalter besitzt ein bestimmtes Kontingent an unterschiedlichen Ressourcen über einen bestimmten Zeitraum zur Erfüllung seiner angebotenen Dienstleistung. In diesem betrachteten Zeitraum treffen differenzierte Kundenaufträge mit unterschiedlicher Wertigkeit ein. Zur Maximierung der Erträge über diesen Zeitraum kann es für das Unternehmen sinnvoll sein Anfragen mit niedrigem Ertrag abzulehnen, sofern im weiteren Verlauf des betrachteten Zeitraums Aufträge mit höherem Ertrag eintreffen. Dies erfolgt in Abhängigkeit der noch vorhanden knappen Ressourcenkapazität.

Eine weitere Alternative wäre es für das instandhaltende Unternehmen, das zu reparierende Gut mit ein neuwertiges Gut auszutauschen. Es handelt sich damit um eine Entscheidung der Lagerentnahme. Die Entscheidung der Reduzierung des vorhandenen Lagerbestands zur Befriedung des Kundenauftrags macht vor allem Sinn, wenn die Reparatur des Auftrags mehr Kosten verursacht, als ein neuwertiges Gut in der Produktion kostet. Auch hier kann zwischen einer kurz- und langfristigen Sichtweise unterschieden werden. Die kurzfristige Sichtweise bezieht sich nur auf das Verhältnis zwischen Reparatur- und Produktionskosten des auftragsbezogenen Gutes. Bei der langfristigen Sichtweise wird der Lagerbestand über einen längeren Zeitraum betrachtet. Sofern in der nahen Zukunft viele Aufträge über neue Produkte eintreffen, ist es für das betrachtete Unternehmen ertragreicher das Gut zu reparieren, damit alle Aufträge erfüllt werden.

Mehr —

## 1.2 Zielsetzung

In dieser Arbeit werden unterschiedliche mathematischen Modell zur Annahmendeckung eines Auftrags zur Instandhaltung eines Gutes betrachtet. Dabei werden verschiedene Betrachtungsweisen der Auftragsannahme via Ressourcenkapazität oder Lagerbestand aufgezeigt und untersucht. Dabei entspricht das reparierte Gut den vom jeweiligen Auftrag geforderten Instandhaltungszustand. Anders formuliert bedeutet dies, dass das produzierende Unternehmen nicht nur die Entscheidungsmöglichkeit über die Instandsetzung des Gutes hat, sondern auch die Möglichkeit

hat in Abhängigkeit des verfügbaren Lagerbestandes die Kundenaufträge mittels eines neuwertigen Gutes zu befriedigen.

Bei der Problemformulierung der Auftragsannahmeentscheidung bei auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen handelt es sich um ein stochastisch-dynamisches Optimierungsmodell. Das Optimierungsmodell muss demnach die Entscheidung treffen, ob die Auftragsannahme zur Instandsetzung des Gutes, die Lagerhaltung des defekten Gutes sowie die Herausgabe eines bereits reparierten Gutes oder die Ablehnung des Kundenauftrags erfolgen soll. Diese Entscheidung erfolgt in Abhängigkeit der verfügbaren restlichen Ressourcenkapazitäten, die zur Instandsetzung der Güter notwendig ist, des aktuell-vorhandenen Lagerbestandes der bereits reparierten Güter und der noch potentiell eintreffenden Anfragen zur Instandhaltung von Gütern.

Zur Formulierung des Problems wird das Konzept des Revenue Managements aufgegriffen. Es handelt sich ursprünglich um ein Konzept zur Auftragsannahme von freien Sitzplätzen von Passagierflugzeugen.<sup>2</sup> Das Grundmodell wird zur Annahme von Kundenaufträgen bzw. -anfragen von Dienstleistungsunternehmen mit beschränkten Ressourcenkapazitäten verwendet.<sup>3</sup> Damit lässt sich die mathematische Darstellung des Optimierungsmodells der Auftragsannahme- und Lagerhaltungsentscheidungen bei auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen als *dynamische Programmierung (DP)* formulieren. Die Aufgabe des DP ist laut Talluri und van Ryzin (2004b) die Entscheidungsfindung zu unterstützen, damit der Gesamtertrag des Dienstleisters maximiert wird. Der Gesamtertrag wird bewertet in Geldeinheiten (GE).

Die Zielsetzung der Arbeit ist demnach das Grundmodell des Revenue Managements zur Annahme von Kundenaufträgen mit unterschiedlichen Verfahren der Auftragsbefriedigung mittels einer Lagerhaltung von Gütern zu erweitern. Zusätzlich zur konzeptionellen Darstellung des hier betrachteten Auftragsannahmeproblems wird für eines der Modellerweiterungen ein Pseudo-Algorithmus entwickelt, welches vorformulierte Beispielszenarien exakt löst. Damit lässt sich numerisch untersuchen, welche Möglichkeiten sich durch die Betrachtung einer Lagerhaltung in der Auftragsannahme von auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen für Unternehmen ergeben.

---

<sup>2</sup>Vgl. ... ???

<sup>3</sup>Vgl. ...

## 1.3 Aufbau der Arbeit

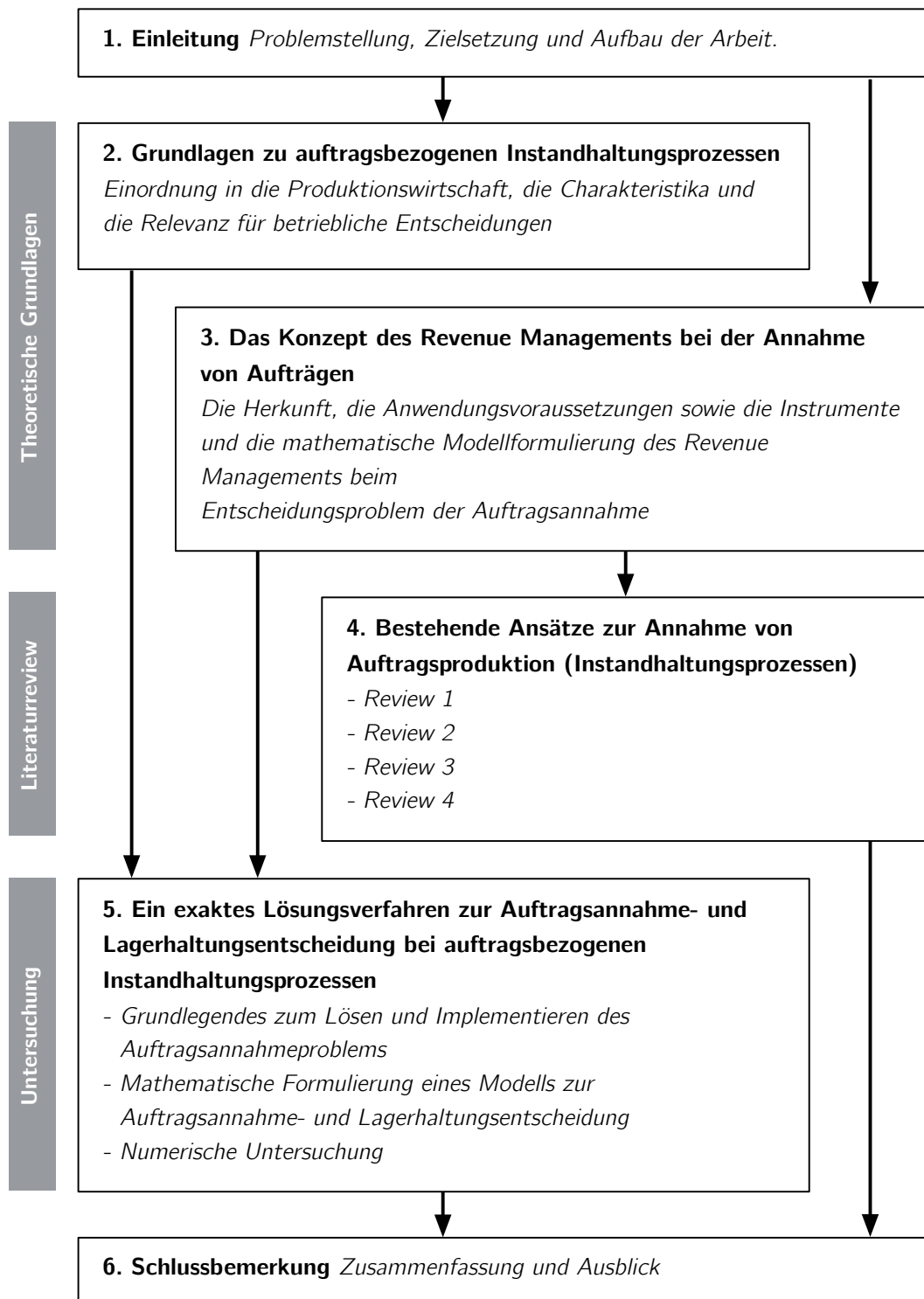


Abbildung 1 Grafische Darstellung der Gliederung der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ist in der Grafik 1 dargestellt. In Kapitel 2 wird vorerst der Begriff der auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen definiert und deren theo-

retische Grundlagen beschrieben. In diesem Kapitel wird der Begriff in die Produktionswirtschaft eingeordnet, sowie die Beschreibung der Charakteristika und der Relevanz für betriebliche Entscheidungen der auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen aufgeführt. Weiter werden im Kapitel 3 die theoretischen Grundlagen der Arbeit vervollständigt, indem das Konzept des Revenue Management bei der Annahme von Aufträgen vorgestellt wird. In diesem Kapitel wird auf die Herkunft des Konzepts eingegangen. Für das Konzept bestehen zusätzlich Anwendungsvoraussetzungen und Instrumente, die in dem Kapitel beschrieben sind. Des Weiteren wird für das Grundmodell des Revenue Managements die mathematische Modellformulierung dargestellt.

Im Anschluss wird in Kapitel 4 ein Literaturüberblick über bestehende Ansätze zur Annahme von Auftragsproduktion und Instandhaltungsprozessen aufgeführt. Es werden hier vier Ansätze näher betrachtet, die den Fokus auf eine heuristische Lösung des Auftragsannahmeproblems legen.

Das Kapitel 5 zeigt die quantitative Untersuchung der Erweiterung des Grundmodells mit der Entscheidung über eine Lagerhaltung auf. Zum einen wird die mathematische Modellformulierung und zum anderen wird ein Pseudo-Algorithmus zum exakten Lösen der Problemstellung beschrieben. Weiter werden die Grundlagen zur Implementierung des Pseudo-Algorithmus genannt. Im letzten Teil des Kapitels wird auf die numerische Untersuchung eingegangen.

Im letzten Kapitel sind die Schlussbemerkungen dieser Arbeit dargestellt. Es handelt dabei um eine Zusammenfassung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und um einen Ausblick für nachfolgende Forschung.

## 2 Grundlagen zu auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen

### 2.1 Einordnung in die Produktionswirtschaft und die Begriffsbestimmung

Unter auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen (engl. maintenance-repair-and-overhaul; Abk. MRO)) wird ein nachgelagerter Prozess eines erweiterten Leistungsprogramms eines Unternehmens verstanden und kann damit als Teilsystem angesehen werden, welches den gesamten Wertschöpfungsprozess verlängert. Es handelt sich nicht um die interne oder beauftragte Instandhaltung von u. a. Anlagen und technischen Systemen, sondern versteht eine Leistung eines Unternehmens. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird von MRO-Prozessen gesprochen. Da es bei MRO-Prozessen um eine Produktion einer Leistung handelt, werden diese der betriebswirtschaftlichen Betrachtung der Produktionswirtschaft zugeordnet.

Bei dem Begriff der Produktionswirtschaft handelt sich um ein Teilgebiet der Betriebswirtschaftslehre.<sup>5</sup> In der Produktionswirtschaft wird der Fokus auf die Produktion von Leistung gelegt.<sup>6</sup> Bei diesem ökonomischen Konzept wird die Transformation von materiellen und nichtmateriellen Inputgütern (Produktionsfaktoren) hin zu gewünschten Outputgütern (Leistung des Unternehmens) betrachtet. Bei den im Laufe der Zeit erweiterten betriebswirtschaftlichen Produktionsfaktoren nach Gutenberg (1959, S. 71) handelt es sich um die Elementarfaktoren Werkstoffe, Betriebsstoffe, Betriebsmittel und objektbezogene humane Arbeitsleistung sowie um die dispositiven Faktoren Betriebsführung, Organisation und Planung.<sup>7</sup> Bei Outputgütern handelt es sich um Produkte in Form von Sach- oder Dienstleistungen die dem Markt und somit der potentiellen Nachfrage der Marktteilnehmer

---

<sup>5</sup>Neben der Teilgebiete Finanzwirtschaft, Marketing, Unternehmensführung, Unternehmensrechnung etc., vgl. dazu Dyckhoff und Spengler (2010), S. 3.

<sup>6</sup>???

<sup>7</sup>????

zur Verfügung gestellt werden.<sup>8</sup> Die Transformation erfolgt durch bestimmte von Menschen veranlasste unternehmerischen Verfahrensweisen.<sup>9</sup> Beispielsweise kann hier die industrielle Fertigung von Verbrauchs- oder Gebrauchsgütern genannt werden.

Bei der Transformation der Inputgüter erfolgt eine qualitative, quantitative, räumliche oder zeitlichen Veränderung der Objekte.<sup>10</sup> Durch diese Veränderung kann seitens des Unternehmens eine Leistung auf dem Markt angeboten werden. Damit diese Leistung den Absatz bei potentiellen Konsumenten findet, muss die Leistung durch die Transformation eine Wertschöpfung erhalten. Der konzeptionelle Rahmen dieses Gedankens bildet die Wertschöpfungslehre (engl. supply chain management; Abk. SCM)).<sup>11</sup> Danach sollte das Ziel eines jeden Unternehmens das Betreiben von Wertschöpfung sein.<sup>12</sup> In der klassischen Auffassung der Wertschöpfungslehre durchläuft die Leistungserstellung alle (Teil-)Systeme des Unternehmens.<sup>13</sup> Abbildung 2 zeigt in Teil a eine mögliche Abfolge der Systeme eines Unternehmens. Eine klassische Abfolge zur Leistungserstellung bzw. der Transformation von Inputgütern hin zu Outputgütern ist die Abfolge der Systeme Forschung/Entwicklung, Beschaffung, Produktion, Distribution sowie Verkauf. Damit ist die um die Wertschöpfung erhöhte Leistung auf dem Markt angekommen und das Unternehmen erzielt damit i. d. R. einen Ertrag.

Sofern das Unternehmen eine **Instandhaltung** bzw. einen MRO-Prozess als Leistungen anbieten kann, wird die Abfolge des Wertschöpfungsprozesses um dieses Unternehmenssystem erweitert. Für den gewerblichen Verkauf von Gütern an Privatkunden können gesetzliche Regelungen bestehen, womit ein Unternehmen gezwungen ist das Unternehmenssystem der Instandhaltung in den Wertschöpfungsprozess aufzunehmen.<sup>14</sup> Andererseits kann ein Unternehmen auch die Instandhaltung seiner eigenen Güter als eigenständig angebotene Leistung bereitstellen und damit den Gesamtertrag des Unternehmens erhöhen (MRO-Prozess). Dieses wird oft von Unternehmen angeboten, die ihren Umsatz mit komplexen Produkten erzielen. Komplexe Produkte zeichnen sich durch ihre hohe Anzahl an hochtechnologischen Komponenten aus, die erst durch den vollständigen und meist kostenintensiven

---

<sup>8</sup>Vgl. Schmidt (2012), S. 1.

<sup>9</sup>Vgl. Tempelmeier und Günther (1994), S. 6, echt????

<sup>10</sup>Vgl. Dyckhoff und Spengler (2010), S. 3.

<sup>11</sup>Vgl. ?, S. ??.

<sup>12</sup>Vgl. ?, S. ??.

<sup>13</sup>???

<sup>14</sup>Vgl. die Richtlinie 1999/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 1999 zu bestimmten Aspekten des Verbrauchsgüterkaufs und der Garantien für Verbrauchsgüter.



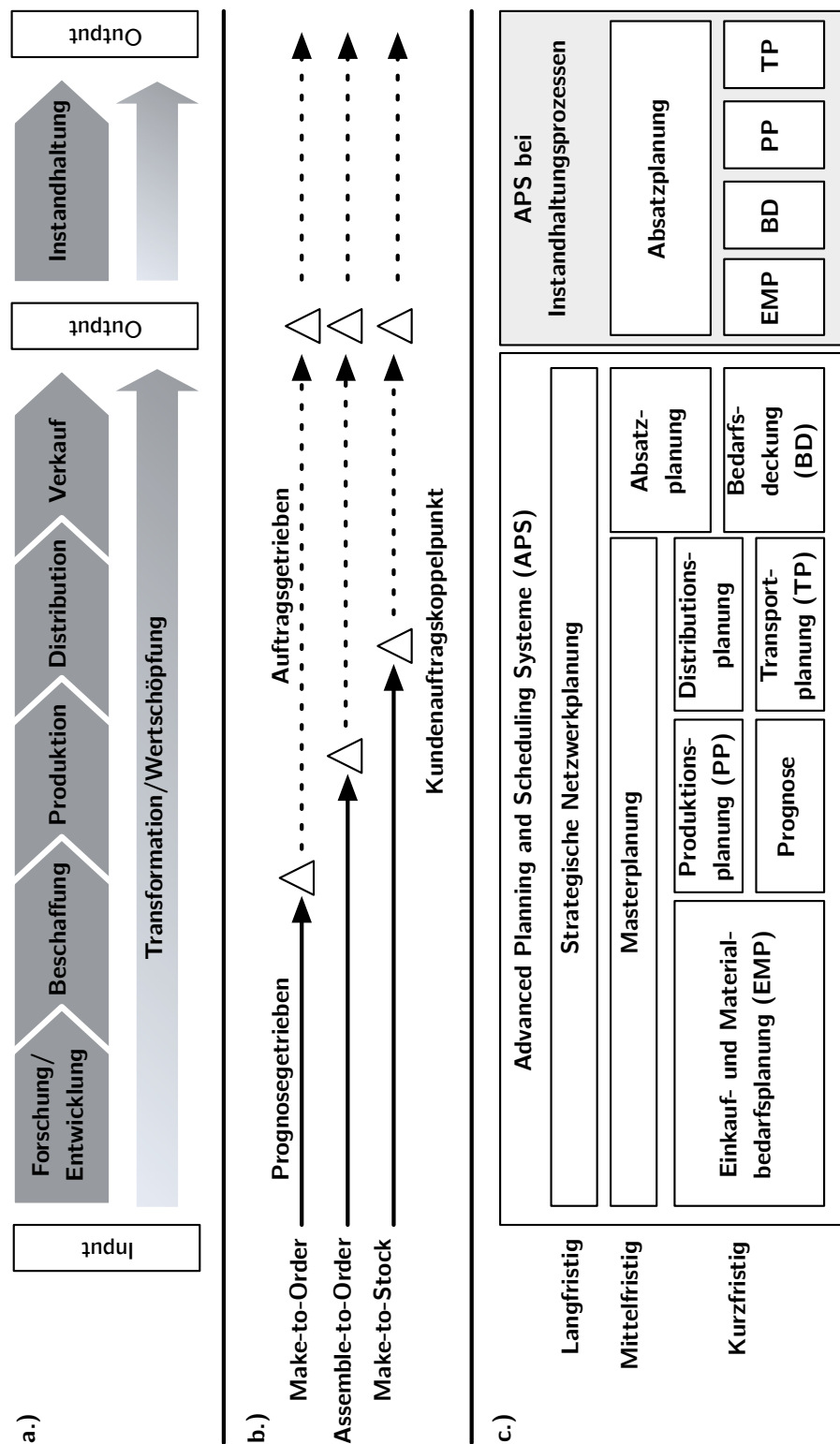


Abbildung 2 Grafische Veranschaulichung eines Wertschöpfungsprozesses

In Anlehnung an: Bach et al. (2012), S. 4-5; Quante (2009), S. 21-22; Meyr et al. (2015), S.

Zusammenschluss eine individuelle Bedürfnisbefriedigung des Nachfragers ermöglichen.<sup>15</sup> In dieser Arbeit werden solche komplexen Produkte betrachtet, die aus einer Vielzahl von Komponenten bzw. Ressourcen bestehen. Dementsprechend handelt es sich bei den in dieser Arbeit betrachteten Instandhaltern um Anbieter von komplexen Produkten.

Weiter versteht Helbing unter Instandhaltung die „Gesamtheit der technischen und organisatorischen Mittel, Vorgänge und Maßnahmen zur Erhaltung, Verbesserung und Wiederherstellung des Funktions-, Leistungs- und Güteniveaus von materiellen Objekten während ihrer Wirkungs- und Lebenszeit durch Wartung, Inspektion und Instandsetzung.“<sup>16</sup> In dieser Arbeit ist mit dem Begriff der MRO-Prozesse gemeint, dass für die betrachteten komplexen Produkte ein spezifischer Ausführungsmodus für die Anfragen verwendet wird, der eine erneute Integration von produkt-spezifischen Ressourcen vorsieht, damit die Funktionsfähigkeit des Produkts (Leistung) wiederhergestellt ist. Damit lässt sich das Verständnis des Begriffs als Leistung eines Unternehmens und als Unternehmenssystem ableiten, welches die Verlängerung und zugleich als Erweiterung des Wertschöpfungsprozesses versteht. Abbildung 2 zeigt im Teil a den erweiterten Wertschöpfungsprozess eines produzierenden Unternehmens inkl. der Integration des Teilsystems der Instandhaltung.

## 2.2 Charakteristika

Nach der DIN 310511 wird Instandhaltung insofern ausgeführt, wenn die Funktionsfähigkeit Betrachtungseinheit sichergestellt werden muss, damit der ursprüngliche Wert erhalten bleibt.<sup>17</sup> Betrachtungseinheit können ganze Anlagen und Maschinen sein oder nur einzelne Komponenten.<sup>18</sup>

Erläuterung nach DIN 31051:<sup>19</sup>

- Instandhaltung ist die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit.

---

<sup>15</sup>Vgl. Schmidt (2009), S. 97

<sup>16</sup>Vgl. Helbing, S. 984

<sup>17</sup>Vgl. Strunz (2012), S. 1.

<sup>18</sup>Vgl. Ryll und Freund (2010), S. 23.

<sup>19</sup>Unbedingt nachlesen!!!!

tungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.

- Als Betrachtungseinheit (BE) wird jedes Bauelement, Gerät, Teilsystem, jede Funktionseinheit, jedes Betriebsmittel oder System, das für sich allein betrachtet werden kann, definiert.

Nach der DIN 31051 werden Einheiten betrachtet, die eine Wartung, Inspektion, Instandsetzung oder Verbesserung bedürfen.<sup>20</sup> Bei einer Wartung handelt es sich um Maßnahmen zur Verzögerung der Abnutzung. Die Inspektion umfasst alle Maßnahmen der Begutachtung sowie der Beurteilung des Ist-Zustandes einer Betrachtungseinheit und die Instandsetzung beinhaltet die Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustands. Mit der Verbesserung sind Maßnahmen gemeint, die den Soll-Zustand der Betrachtungseinheit erweitern, damit mögliche Defekte verhindert werden.

Instandhaltungsprozesse lassen sich weiter nach Ausführungszeitpunkt und Ausführungsort der Maßnahmen unterscheiden.<sup>21</sup> Diese Unterscheidung spielt bei der Betrachtung von MRO-Prozessen eine untergeordnete Rolle.

Da der Absatz zeitlich vor der Produktion der Leistung stattfindet, handelt es sich bei dem hier betrachteten MRO-Prozessen um eine Auftragsfertigung.<sup>22</sup> In der Literatur wird für die Auftragsfertigung oft der englischen Begriff *Make-to-Order*; Abk. *MTO*) verwendet. Abzugrenzen ist der Begriff von der Lagerfertigung (engl. *Make-to-Stock*; Abk. *MTS*) und der kundenindividuellen Fertigung mit standardisierten Komponenten (engl. *Assemble-to-Order*, Abk. *ATO*). Dies kann zum einen anhand des Kundenauftragskoppelpunkts und zum anderen anhand der Planungsgrundlage der Leistungserstellung getätigt werden. Der Kundenauftragskoppelpunkt zeigt den erstmaligen Kundenkontakt bzw. Auftragseingang auf. Mit Eingang des Kundenauftrags wechselt die Planungsgrundlage der Leistungserstellung von prognosegetriebener hin zu auftragsgetriebener Planung. Die prognosegetriebenen Planungsgrundlage für die Fertigung ist mit einem Prognosefehler für die Ausführung der unternehmerischen Tätigkeit behaftet, was der analytischen Betrachtung des Kundenauftragskoppelpunkts zur Bestimmung der notwendigen Ressourcenkapazität und der weiteren Auftragseingänge weiteres Gewicht verleiht.<sup>23</sup>

<sup>20</sup>Vgl. Ryll und Freund (2010), S. 23-24

<sup>21</sup>Vgl. Ryll und Freund (2010), S. 24-26; Hinsch (2010), S. 190-191

<sup>22</sup>Vgl. Hax (1956), S. 247; Gutenberg (1965), S. 164-165

<sup>23</sup>Vgl. Quante (2009), S. 21

Bei einer MTO trifft vor der eigentlichen Produktion der Leistung der Kundenauftrag ein. Damit sind die Forschungs/Entwicklung der Leistung und die Beschaffung der Komponenten bzw. Ressourcen hauptsächlich prognosegetrieben. Alle weiteren Teilsysteme des Unternehmens können sich speziell an den Forderungen des Auftrags richten. Ähnliche Rahmenbedingung besitzt eine ATO, die den Kundenauftragskoppelpunkt innerhalb des Produktionsablaufs hat. Da nur ein gewissen Umfang der Komponenten an auftragsspezifischen Eigenschaften angepasst wird, sind die Grundkomponenten der Produkte abhängig der Prognosemethoden des Unternehmens. Bei MTS erfolgt der Auftragseingang erst nach der Produktion, womit diese Fertigungsart den höchsten Anteil des Einsatzes von Prognosemethoden aufweist.<sup>24</sup> Abbildung 2 zeigt im Teil b die Unterschiede der Fertigungsarten im Verlauf des Wertschöpfungsprozesses.

Da bei MRO-Prozessen erst mit Auftragseingang die erforderlichen Produktionsschritte und der Ressourcenbedarf bekannt sind, werden diese mit MTO-Prozessen gleichgesetzt. Zur Erfüllung möglichst vieler Aufträge muss eine möglichst gute Prognose der benötigten Ressourcen vorliegen, damit kurze Liefer- und Durchlaufzeiten gewährleistet bleiben.<sup>25</sup> Sofern die Prognose fehlerhaft ist und ein zu geringer Bestand an Ressourcen vorhanden ist, konkurrieren die unterschiedlich eintreffenden Anfragen nach MRO-Prozessen des Unternehmens bzgl. der Ressourcen untereinander. Sofern ein zu hoher Ressourcenbestand vorhanden ist, stellt sich die Frage über den besten Mix der unterschiedlichen Aufträge, damit die Ressourcenkapazität optimal genutzt wird und dementsprechend der Ertrag maximiert wird. Im nächsten Abschnitt wird dieser Frage in Bezug von Produktionsplanungssystemen und der betrieblichen Entscheidungsfindung weiter nachgegangen.

## 2.3 Relevanz für betriebliche Entscheidungen

Die Entscheidung über die Ausgestaltung des MRO-Prozesses hat eine hohe Relevanz für den Erfolg der angebotenen Leistung sowie der Effizienz des gesamten SCM-Prozesses des Unternehmens und kann der nachhaltigen Konsumentenzufriedenheit dienen. Wichtiger Erfolgsfaktor für ein erfolgreiches SCM und somit der Konsumentenzufriedenheit ist der Einsatz von Advanced Planning and Scheduling Systemen (APS).<sup>26</sup>

<sup>24</sup>Vgl. Fleischmann und Meyr (2004), S. 300-303; Quante (2009), S. 21-22

<sup>25</sup>Vgl. Thaler (2001), S. 68.

<sup>26</sup>Vgl. Fleischmann und Meyr (2004), S. 298

Bei APS handelt es sich um computergestützte Systeme, mit denen die Planung der ganzheitlichen Wertschöpfung der Leistung mit Hilfe von mathematischer Modelle des Operations Research (OR) unterstützt wird.<sup>27</sup> Neben der reinen Planung der Produktion, helfen moderne APS mit ihrem modularen Aufbau auch bei der gesamten Auftragsabwicklung und unterstützen damit Unternehmensteilnehmer bei betrieblichen Entscheidungen innerhalb des SCM-Prozesses, wie z. B. bei dem Einkauf von Ressourcen, der Produktionsplanung und dem Absatz der Leistung.<sup>28</sup>

Meyr et al. (2015) sortieren einige wichtige Module eines APS in den Dimensionen des SCM-Prozesses und des Planungshorizonts. Abbildung 2 in Teil c greift diese Sortierung auf. Bei dem Modul der strategischen Netzwerkplanung werden die Lieferanten, Werke und Lagerpunkte in einer langfristigen Betrachtungsweise festgelegt. Die Entscheidungen die Aufgrund der strategischen Netzwerkplanung getroffen werden, haben großen Einfluss auf die langfristige Rentabilität sowie Wettbewerbsposition des Unternehmens und haben räumlichen sowie zeitlichen Charakter.<sup>29</sup> D. h. das Unternehmen die Planungsmodelle und Entscheidungen aufgrund der strategischen Netzwerkplanung in Bezug auf bestimmte regionale Gegebenheiten und einem vordefinierten Betrachtungszeitraum festlegen????<sup>30</sup> Die Absatzplanung dient einerseits der Absatzprognose und andererseits der Analyse der notwendigen Sicherheitsbestände.<sup>31</sup> Das Modul Masterplanung synchronisiert den Materialfluss entlang des gesamten SCM-Prozesses und unterstützt dadurch mittelfristige Entscheidungen über die effiziente Nutzung der Ressourcen, damit für einen kontinuierlichen Materialfluss größere Puffer gemieden werden.<sup>32</sup> Mit dem Modul der Einkaufs- und Materialbedarfsplanung werden kurzfristig terminierte Pläne für Komponenten und Teile (Ressourcen) für die Fertigung berechnet.<sup>33</sup> Aufbauend auf diesen Plänen kann die Produktionsplanung und die weitere Prognose für die Produktion und Logistik erfolgen, die den organisatorischen Anforderungen des Produktionssystems gerecht werden müssen und einen kurzfristigen Planungshorizont aufweisen.<sup>31</sup> Bei diesen Modulen werden in einer kurzfristigen Betrachtung u. a. die Maschinenverfügbarkeit und die Losgrößen geplant bzw. prognostiziert. Eine effiziente Produktionsplanung setzt eine gute Prognose voraus.<sup>34</sup> Bei den Modulen der Distributions- und Transportplanungen werden die Pläne für die Verkaufsstel-

<sup>27</sup>????? steht eig auch bei Fleischmeyer, aber besser andere Quelle finden...

<sup>28</sup>Vgl. Meyr et al. (2015), S. 99-100; Fleischmann und Meyr (2004), S. 298

<sup>29</sup>Vgl. Goetschalckx und Fleischmann (2005), S. 117-118

<sup>30</sup>Datengrundlage bilden u. a. Prognosen und Wirtschaftstrends.

<sup>31</sup>Vgl. Fleischmann und Meyr (2004), S. 298,

<sup>32</sup>Vgl. Rohde und Wagner (2002), S. 143.

<sup>33</sup>Vgl. Stadtler (2008), S. 217-218.

<sup>34</sup>Vgl. Dickersbach (2004), S. 131.

len und die Logistik generiert.<sup>31</sup> Zum Abschluss wird das Modul Bedarfsdeckung aufgeführt. Das Modul dient hauptsächlich der Kundenzufriedenheit, indem es die eintreffenden Kundenaufträge auf Realisierbarkeit prüft und die geforderte Lieferung der Leistung zusagt.<sup>31</sup>

Diese Module sind von Meyr et al. (2015) jedoch im Verhältnis eines typischen SCM-Prozess gesetzt. Es stellt sich die Frage, welche Systeme bei betriebliche Entscheidungen durch Einbeziehung von MRO-Prozessen in den SCM-Prozess relevant sind. Die strategische Netzwerkplanung scheint keinen direkten Einfluss auf MRO-Prozesse zu haben, da diese sich an der Grundleistung des Unternehmens orientiert. Anders formuliert bedeutet dies, dass nur dort eine Instandhaltung der Produkte angeboten wird, wo auch das eigentliche Produkt den Absatz findet. Inwieweit die Masterplanung ebenfalls den Materialfluss von MRO-Prozessen synchronisiert wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Aus dem Sachverhalt der Auftragsfertigung folgt, dass keine Distribution notwendig ist und dementsprechend finden die Distributionsplanung keine Relevanz bei MRO-Prozessen.

Bei MRO-Prozessen sind die Module der Absatzplanung, der Einkaufs- und Materialbedarfsplanung, der Produktionsplanung, die Transportplanung und der Bedarfsdeckung relevant. Ein effizientes APS bei MRO-Prozessen muss den erwarteten Absatz bzw. die erwarteten Auftragseingänge mittelfristig gut prognostizieren können. Aufbauend auf dieser Prognose kann eine Einkaufs- und Materialbedarfsplanung erfolgen. Dies erfolgt jedoch kurzfristig, da der Ressourcenbedarf abhängig der Kundenaufträge ist. Anschließend erfolgt bereits die Prüfung der Realisierbarkeit und abhängig dieser die Entscheidung über die Annahme des Auftrags über die Instandsetzung des Produkts mittels des Moduls der Bedarfsdeckung. Anschließend erfolgt die Produktions- und Transportplanung.

In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Auftragsannahme mittels des Moduls der Bedarfsdeckung gelegt. Die Entscheidung, ob ein Auftrag zur Instandhaltung angenommen wird, ist abhängig der verfügbaren Ressourcenkapazität und des Lagerbestand an Teilen bzw. Fertigerzeugnissen (Produkten). Mit Ressourcen wird in dieser Arbeit entweder ein endlicher Bestand an Fertigungsteile zur Produktion der Produkte verstanden oder es handelt sich um regenerative Ressourcen, wie z. B. Maschinenkapazität oder Arbeitskraft. Erneuerbare Ressourcen zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit Ablauf des Betrachtungszeitraums den vordefinierten Kapazitätswert wieder annehmen. Bei dem Lagerbestand handelt es sich wiederum um einen physischen Bestand an Teilen, die für die Fertigung bzw. Instandhal-

tung verwendet werden, oder um Fertigerzeugnisse, bei denen es sich um fertig erzeugte Leistungen in Form von Produkten handelt. Für die Entscheidungsträger muss das Modul der Bedarfsdeckung dementsprechend die Entscheidung über die Auftragsannahme unter Beachtung der Auftrags-, der Materialbedarfs- und der Produktionsplanung unterstützen. Im nächsten Kapitel wird eine OR-Methode zur klassischen Auftragsannahme bei konstanten Ressourcenkapazitäten vorgestellt und im Kapitel ?? wird dieses Modell um die Besonderheiten der MRO-Prozesse erweitert.

### 3 Das Konzept des Revenue Managements bei der Annahme von Aufträgen

#### 3.1 Das Revenue Managements bei der Auftragsannahme

Zur Entscheidungsunterstützung bei der Annahme von Kundenaufträgen wird in der aktuellen Forschung vermehrt auf das Konzept des Revenue Managements zurückgegriffen.<sup>5</sup> Da eine kurzfristige Anpassung der mittelfristig bereitgestellten Kapazitäten einer Dienstleistungsproduktion an eine unsichere und schwankende Nachfrage nicht möglich ist, wird mit dem Konzept eine effizientere Auslastung der bestehenden Kapazitäten ermöglicht.<sup>6</sup>

Der Begriff *Revenue Management* wird im deutschsprachigen Raum meist mit *Ertragsmanagement* oder *Erlösmanagement* übersetzt.<sup>7</sup> Yield Management wird als Synonym benutzt.<sup>8</sup> Dabei greift der Begriff *Yield* zu kurz, da damit in der Luftverkehrsbranche der Erlös je Passagier und geflogener Meile bezeichnet wird.<sup>9</sup> Der Term *Revenue Management* hat sich jedoch gegenüber Yield Management durchgesetzt, da der Yield (Durchschnittsertrag) sich theoretisch nur durch einen Passagier maximieren lässt und somit die Maximierung als Zielsetzung nicht sinnvoll ist.<sup>10</sup> Erste Ansätze des RM sind in der Praxis entwickelt. Durch die Deregulierung des amerikanischen Luftverkehrsmarktes im Jahr 1978 mussten die traditionellen Fluggesellschaften ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Billiganbietern erhöhen

---

<sup>5</sup>Vgl. Klein (2001), S. 246.

<sup>6</sup>Vgl. Spengler und Rehkopf (2005), S. 124.

<sup>7</sup>Vgl. z. B. Zehle (1991), S. 486

<sup>8</sup>Vgl. z. B. Kolisch und Zatta (2006), S. 319

<sup>9</sup>Vgl. z. B. Weatherford (1998), S. 69

<sup>10</sup>Vgl. Klein und Steinhardt (2008), S. 6; Spengler und Rehkopf (2005), S. 124-125.



und entwickelten das frühe RM.<sup>11</sup>

Kimms und Klein (2005) versuchen durch eine umfangreiche Diskussion einige Erklärungsansätze aufzuzeigen (Warum? Wovon?). Das RM hat vor allem aus dem älteren, englischsprachigen Bereich einen engen Bezug zu konkreten Anwendungsgebieten. Die Autoren zeigen auf, dass viele Autoren versuchen das komplexe Konzept des Revenue Managements in einer kurzen Erklärung zu überführen. Dieses läuft letztlich darauf hinaus, dass diese Autoren einige situative Merkmale und Instrumente des Managements vermischen, gleichzeitig aber versuchen, die Zielsetzung festzulegen und das Anwendungsgebiet auf bestimmte Branchen zu beschränken.

Weiter wird in der Literatur der Begriff des RM unterschiedlich definiert. Friege (1996) bezeichnet das RM als *Preis-Mengen-Steuerung*, Daudel und Vialle (1992) als *Preis-Kapazitäts-Steuerung* und Talluri und van Ryzin (2004b) verstehen es als das gesamte *Management der Nachfrage*. Die beiden ersteren Definitionen können als Synonym für eines der Instrumente des RM stehen und daher finden diese für das gesamte Konzept keine weitere Verwendung.<sup>12</sup> Nachfolgend wird die Definition von Klein (2001, S. 248) aufgegriffen:

„Revenue Management umfasst eine Reihe von quantitativen Methoden zur Entscheidung über Annahme oder Ablehnung unsicherer, zeitlich verteilt eintreffender Nachfrage unterschiedlicher Wertigkeit. Dabei wird das Ziel verfolgt, die in einem begrenzten Zeitraum verfügbare, unflexibel Kapazität möglichst effizient zu nutzen.“

Petrick (2009) definiert das RM als Ziel einer Unternehmung die Gesamterlöse zu maximieren, die sich aufgrund der speziellen Anwendungsgebiete ergeben. Damit definiert Petrick (2009) das RM als Zusammenfassung aller Interaktionen eines Unternehmens, die mit dem Markt, also der Absatz- oder Nachfrageseite, zusammenhängen. Im Kern lassen sich drei wichtige Perspektiven für eine Definition des Revenue Managements nach Petrick (2009), Stuhlmann (2000), Corsten und Stuhlmann (1999) übernehmen:

1. Ziel ist es die Gesamterlöse unter möglichst optimaler Auslastung der vorhandenen Kapazitäten zu maximieren.

---

<sup>11</sup>Vgl. Petrick (2009), S. 1-3

<sup>12</sup>Vgl. z. B. Petrick (2009)

2. Durch eine aktive Preispolitik wird das reine Kapazitäts- oder Auslastungsmanagement unterstützt.
3. Für die erfolgreiche Implementierung des Revenue Managements ist eine umfangreiche Informationsbasis notwendig. Es muss u. a. eine möglichst gute Prognose über die zukünftige Nachfrage und Preisbereitschaft der Kunden vorhanden sein.

Kimms und Klein (2005) weisen darauf hin, dass eine differenzierte Betrachtung des Konzepts notwendig ist: Einerseits im Hinblick auf die **Anwendungsvoraussetzungen** und andererseits im Hinblick auf die **Instrumente des Revenue Managements**, damit verdeutlicht dargestellt ist, in welchen Branchen das RM Potentiale liefert. Dabei sollten branchenspezifische Besonderheiten, neben den zahlreichen Ähnlichkeiten Berücksichtigung finden, sowie das begrenzte Kapazitätenkontingent, damit die Potentiale des RM zur Maximierung der Gesamterlöse in den Dienstleistungsbranchen erfolgen kann.<sup>13</sup> In dem nachfolgenden Kapitel wird dieser Empfehlung gefolgt und die Anwendungsvoraussetzungen sowie Instrumente des RM vorgestellt.

### 3.2 Anwendungsvoraussetzungen und Instrumente des Revenue Managements

Petrick (2009) weist darauf hin, dass anhand von speziellen Anwendungsvoraussetzungen geprüft wird, ob das RM für die jeweilige Situation des Unternehmens (oder die gesamte Branche) zur Maximierung des Gesamterlöses beiträgt. Kimes (1989b) definiert die in der Literatur häufigsten Anwendungsvoraussetzungen:<sup>14</sup>

- „weitgehend fixe“ Kapazitäten
- „Verderblichkeit“ bzw. „Nichtlagerfähigkeit“ der Kapazitäten und der Leistung
- Möglichkeit zur Vorausbuchung von Leistungen
- stochastisch, schwankende Nachfrage

<sup>13</sup>Vgl. z. B. von Martens (2009), S. 11-24

<sup>14</sup>Vgl. u. a. Friege (1996), S. 616-622, und Weatherford und Bodily (1992), 831-832.

- hohe Fixkosten für die Bereitstellung der gesamten Kapazitäten bei vergleichsweise geringen variablen Kosten für Produktion einer Leistungseinheit
- Möglichkeit zur Marktsegmentierung und im Ergebnis dessen zur segmentorientierten Preisdifferenzierung

Aufgrund der Anwendungsvoraussetzungen des RM kann das Konzept auch auf die Auftragsfertigung bzw. MRO-Prozesse übertragen werden.<sup>15</sup> Bei der Auftragsfertigung wird ein bestimmter Buchungszeitraum betrachtet, in dem weitestgehend von fixen Kapazitäten der Ressourcen ausgegangen werden kann. Durch Ablauf des Buchungshorizonts verfällt die Kapazität, da es sich hauptsächlich um erneuerbaren Kapazitäten handelt (Arbeitskraft, Maschinenkapazität, usw.). Anders formuliert, die Ressourcen werden zur nächsten Leistungserstellung erneuert. Dabei beschreibt  $t$  einen Zeitpunkt des Buchungshorizonts. Die Gesamtlänge des Buchungshorizonts entspricht  $T$  und verläuft rückwärts bis zur Leistungserstellung des betrachteten Buchungshorizonts. Da der Buchungshorizont mit genau einer Leistungserstellung gekoppelt ist, können diese mit einem Parameter  $i$  beschrieben werden. Mit der Leistungserstellung werden die verbuchten Kapazitäten aus dem Buchungshorizont durch die Auftragsproduktion beansprucht. Mit dem Start der Leistungserstellung erfolgt ebenfalls die Vorausbuchungszeit für die nachfolgende Leistungserstellung  $i + 1$ . Bei der Leistungserstellung  $i + 1$  sind die Kapazitäten der Ressourcen regeneriert. Abbildung 4 zeigt den Zusammenhang von Buchungshorizont, Leistungserstellung und abnehmenden Ressourcenkapazität.

??? Klein und Steinhardt (2008) setzen sich mit den Anwendungsvoraussetzungen von mehreren Autoren auseinander. Sie konnten Gemeinsamkeiten innerhalb der Definitionen der Autoren finden, aber zeigten auch die Unterschiede und die Kritiken auf. In ihrer Arbeit übernehmen sie die Anwendungsvoraussetzung von Corsten und Stuhlmann (1998): "Marktseitige Anpassungserfordernis steht unternehmensseitig unzureichendes Flexibilitätspotential hinsichtlich der Kapazität – bezogen auf Mittel- oder Zeitaufwand – gegenüber". Zugleich weisen sie jedoch darauf hin, dass zum Verständnis eines komplexen und interdisziplinären Ansatzes auch die Definitionen anderer Autoren im Hinblick auf das Verständnis der Anwendungsvoraussetzungen beitragen. ???

Auf Grundlage der von Friege (1996) beschriebenen Anwendungsvoraussetzungen hat Petrick (2009) drei Instrumente des RM bestimmt. Die Instrumente benö-

---

<sup>15</sup>Vgl. Hintsches et al. (2010), S.176-178; Kimes (1989b), S. 349-351.

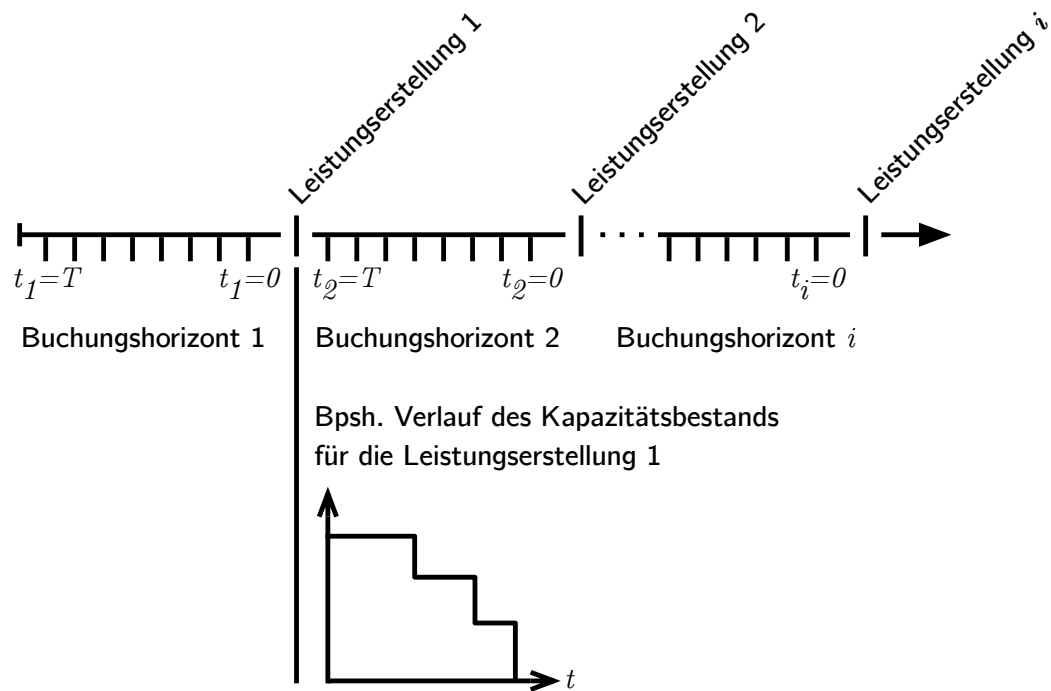


Abbildung 3 Grafische Darstellung des Buchungshorizonts bei der Auftragsfertigung  
In Anlehnung an: ???.

tigen als Grundlage *Daten der Prognose*, damit sie zur Anwendung kommen.<sup>16</sup> Zu den Instrumenten zählen die **segmentorientierte Preisdifferenzierung**, die **Kapazitätensteuerung** und die **Überbuchungssteuerung**. Es lassen sich unterschiedliche Abhängigkeiten der Instrumente untereinander ermitteln.<sup>17</sup>

Erklärung segmentorientierte Preisdifferenzierung, Kapazitätssteuerung, Überbuchungssteuerung?

### 3.3 Mathematische Modellformulierung des Revenue Managements

Im Folgenden wird das dynamisch, stochastische Grundmodell des RM nach Talluri und van Ryzin (2004, S. 18-19) beschrieben. Ein Dienstleistungsnetzwerk eines Anbieters benötigt jeweils zur Erstellung der Dienstleistungen ein bestimmtes Kon-

<sup>16</sup>Die Prognose zählt laut Petrick (2009) nicht als eigenständiges Instrument des RM.

<sup>17</sup>Als Beispiel baut die Kapazitätensteuerung auf den Ergebnissen der Preisdifferenzierung auf und die Überbuchungssteuerung kann selten ohne Kapazitätensteuerung gelöst werden.

tingent an Ressourcen aus einer Menge an Ressourcen  $\mathcal{H} = \{1, \dots, l\}$ . Der Index  $h$  beschreibt dabei eine jeweilige Ressource und der Index  $l$  die gesamte Anzahl an möglichen Ressourcen. Die jeweilige Kapazität einer Ressource  $h \in \mathcal{H}$  ist durch den Parameter  $c_h$  beschrieben und die gesamten Kapazitäten der Ressourcen ist als Vektor  $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_h, \dots, c_l)$  formuliert. Eine Anfrage nach einem Produkt (Dienstleistung) in dem Netzwerk ist durch den Parameter  $j$  aus der Menge an möglichen Produkthanfragen  $\mathcal{J} = \{1, \dots, n\}$  beschrieben. Die gesamte Anzahl an Produkthanfragen ist durch den Parameter  $n$  definiert. Sobald eine Produkthanfrage  $j \in \mathcal{J}$  akzeptiert und somit abgesetzt ist, fällt für den Absatz der Ertrag  $r_j$  an. Der jeweilige Verbrauch einer Ressource  $h$  durch Annahme einer Anfrage nach einem Produkt  $j$  ist anhand des Parameters  $a_{hj}$  beschrieben. Durch Vektorschreibweise kann der Ressourcenverbrauch für eine Anfrage nach einem Produkt  $j$  als Vektor  $\mathbf{a}_j = (a_{1j}, \dots, a_{hj}, \dots, a_{lj})$  formuliert werden. Der Buchungshorizont entspricht  $T$  Perioden und kann jeweils in einzelne Perioden  $t = 1, \dots, T$  aufgeteilt werden. Dabei muss Beachtung finden, dass der Buchungshorizont  $T$  gegenläufig verläuft. Die Wahrscheinlichkeit der Nachfrage eines Produkts  $j$  in der Periode  $t$  entspricht  $p_j(t)$  und die Wahrscheinlichkeit, dass keine Nachfrage in der Periode  $t$  eintrifft, entspricht  $p_0(t)$ . Es gilt  $\sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t) + p_0(t) = 1$  und somit kann  $p_0(t)$  durch den Term  $p_0(t) = 1 - \sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t)$  für die Periode  $t$  ermittelt werden.<sup>18</sup> Die noch erwartete Nachfrage  $D_{jt}$  für ein bestimmtes Produkt  $j$  für eine beliebige Periode  $t$  lässt sich durch  $\sum_{\tau=1}^t p_j(\tau)$  aggregieren.

Mit den vorangegangenen Parametern kann der maximal erwartete Ertragswert  $V(\mathbf{c}, t)$  für eine Periode  $t$  bei einer noch vorhandenen Ressourcenkapazität  $\mathbf{c}$  als Bellman-Gleichung formuliert werden (**DP-op**):<sup>19</sup>

$$V(\mathbf{c}, t) = \sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t) \max[V(\mathbf{c}, t-1), r_j + V(\mathbf{c} - \mathbf{a}_j, t-1)] + p_0(t)V(\mathbf{c}, t-1) \quad (1)$$

Es handelt sich hier um die Modellformulierung der Dynamischen Programmierung (DP) im Netzwerk RM. Das Konzept der DP wurde von Bellman entwickelt und dient der Ermittlung der optimalen Politik in Bezug auf den aktuellen Zustand eines Systems.<sup>20</sup> Dabei bildet jeder Erwartungswert  $V(\mathbf{c}, t)$  mit der Ressourcenkapazität  $\mathbf{c}$  zum Zeitpunkt  $t$  einen Systemzustand des Netzwerks ab. Eine derartige Formulierung eines Optimierungsproblems wird oft als sogenannte *Bellman'sche*

<sup>18</sup>Vgl. Talluri und van Ryzin, S. 18

<sup>19</sup>???

<sup>20</sup>Vgl. Bellman (1954), S. 4-5

Funktionsgleichung oder Bellman-Gleichung bezeichnet.<sup>21</sup>

Die Gleichung weist die Grenzbedingungen

$$V(\mathbf{c}, 0) = 0 \text{ wenn } \mathbf{c} \geq 0 \text{ sowie} \quad (2)$$

$$V(\mathbf{c}, t) = -\infty \text{ wenn } c_j < 0 \forall j \in \mathcal{J} \quad (3)$$

auf, da eine jeweilig verbleibende Kapazität nach Bereitstellung des Produkts wertlos und eine negative Ressourcenkapazität nicht möglich ist.

Die Gleichung (1) lässt sich umformen, indem die Entscheidungen über die Annahme und Ablehnung einer Produkthanfrage separiert wird. Da  $\sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t) + p_0(t) = 1$  gilt, kann die Gleichung weiter vereinfacht werden:<sup>22</sup>

$$\begin{aligned} V(\mathbf{c}, t) &= \sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t) V(\mathbf{c}, t-1) + \sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t) \max[0, r_j - V(\mathbf{c}, t-1) \\ &\quad + V(\mathbf{c} - \mathbf{a}_j, t-1)] + p_0(t) V(\mathbf{c}, t-1) \\ &= V(\mathbf{c}, t-1) + \sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t) \max[0, \\ &\quad r_j - V(\mathbf{c}, t-1) + V(\mathbf{c} - \mathbf{a}_j, t-1)] \end{aligned} \quad (4)$$

Eine eintreffende Anfrage nach einem Produkt  $j$  ist demnach dann akzeptiert, wenn der Ertrag  $r_j$  größer gleich der Differenz des Erwartungswertes des Ertrags unter der Prämisse der Annahme der Produkthanfrage und des Erwartungswertes des Ertrag unter der Prämisse der Ablehnung der Produkthanfrage ist:

$$r_j \geq V(\mathbf{c}, t-1) - V(\mathbf{c} - \mathbf{a}_j, t-1) \quad (5)$$

Dabei kann der rechte Term (5) als Opportunitätskosten (OK) der Auftragsannahme angesehen werden:

$$OC_j = V(\mathbf{c}, t-1) - V(\mathbf{c} - \mathbf{a}_j, t-1) \quad (6)$$

Somit erfolgt die Akzeptanz einer Anfrage nach einem Produkt  $j \in \mathcal{J}$  ausschließlich nur dann, sofern die OK des Ressourcenverbrauchs niedriger als der Ertrag

<sup>21</sup>???

<sup>22</sup>Vgl. Spengler et al. (2007), S. 161.

ist. Der maximal mögliche Erwartungswert unter Beachtung der Kapazität  $\mathbf{c}$  zum Zeitpunkt  $t$  ist damit der Erwartungswert unter der Prämisse der Ablehnung der Anfrage zum nächsten Zeitpunkt  $t - 1$  inkl. der Summe der Erträge abzgl. der OK durch Annahme der möglichen Anfragen über aller Produkte  $j \in \mathcal{J}$  und lässt sich mathematisch wie folgt definieren:

$$V(\mathbf{c}, t) = V(\mathbf{c}, t - 1) + \sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t) \max[0, r_j - OC_j] \quad (7)$$

Zur Veranschaulichung des Netzwerk RM wird ein Netzwerk mit zwei Produkten  $j \in \mathcal{J}$  und zwei Ressourcen  $h \in \mathcal{H}$  betrachtet. Die Ressource  $h = 1$  hat eine Kapazität von  $c_1 = 2$  und die Ressource  $h = 2$  hat eine Kapazität von  $c_2 = 1$ . Zur Ausführung des Produkt  $j = 1$  wird die Ressource  $h = 1$  mit einer Einheit benötigt und zur Ausführung des Produkt  $j = 2$  wird wiederum eine Einheit der Ressource  $h = 2$  gebraucht. Damit gilt  $a_{11} = 1$  und  $a_{22} = 1$ . Durch Annahme einer Anfrage nach Produkt  $j = 1$  wird der Ertrag  $r_1 = 100$  und durch Annahme von Produkt  $j = 2$  eine Ertrag von Ertrag  $r_2 = 200$  generiert. Der Buchungshorizont entspricht  $T = 4$ . Die Wahrscheinlichkeiten des Eintreffens eine Anfrage nach Produkt  $j = 1$  über die Buchungsperioden  $t \in T$  lässt sich als Vektor  $p_1(t) = (0.5, 0.5, 0.5, 0.5)$  beschreiben. Analog lassen sich die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreffen der Produkthanfragen  $j = 2$  als Vektor  $p_2(t) = (0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$  definieren. Die Gegenwahrscheinlichkeiten, dass keine Anfragen eintreffen, lassen sich mit  $p_0(t) = 1 - \sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t)$  berechnen und bilden den Vektor  $p_0(t) = (0.4, 0.4, 0.4, 0.4)$ . Durch Vereinfachung der Gleichung (1) zur Gleichung (4) werden die Gegenwahrscheinlichkeiten  $p_0(t)$  nicht mehr benötigt und im weiteren Verlauf der Arbeit nicht mehr berücksichtigt.

Die Parameter lassen sich damit abschließend wie folgt definieren:

$$j = \{1, 2\}, h = \{1, 2\}, r_1 = 100, r_2 = 200, \text{ Startperiode } t = 4,$$

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, p_1(t) = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix}, p_2(t) = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \end{pmatrix}$$

Die mathematische Modellformulierung des stochastisch, dynamisches Programms aus Gleichung (4) lässt sich als Graph darstellen, der die einzelnen Systemzustände

für die DP aufzeigt. Der Erwartungswert  $V(\mathbf{c}, t)$  ist abhängig vom Erwartungswert  $V(\mathbf{c}, t-1)$  und vom Erwartungswert  $V(\mathbf{c}-\mathbf{a}_j, t-1)$ . Der Erwartungswert  $V(\mathbf{c}, t-1)$  ist wiederum abhängig vom Erwartungswert  $V(\mathbf{c}, t-2)$  und vom Erwartungswert  $V(\mathbf{c}-\mathbf{a}_j, t-2)$ , usw. Abbildung 4 zeigt die erste rekursive Folge für die Gleichung (4) als Graphen auf und im nachfolgenden wird auf die Notation eingegangen.

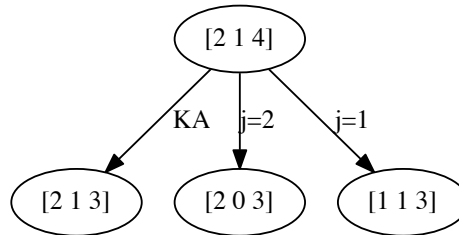


Abbildung 4 Beispielhafte Darstellung einer rekursiven Folge eines Netzwerk RM

Ein Knoten repräsentiert einen Systemzustand des Netzwerks mit den vorhandenen Kapazitäten  $\mathbf{c}$  zum Zeitpunkt  $t$ . Dabei wird als Benennung für den Knoten eine Zahlenfolge verwendet, bei dem die ersten Einträge die Ressourcenkapazität  $\mathbf{c}$  in Länge der Ressourcen  $h$  entsprechen und der letzte Eintrag den Zeitpunkt  $t$  aufzeigt. Bspw. zeigt der Startknoten des Beispiels die Zahlenfolge  $[2 \ 1 \ 4]$ , da das Netzwerk noch die volle Ressourcenkapazität  $\mathbf{c} = (2, 1)$  aufweist und sich im Zeitpunkt  $t = 4$  befindet. Von diesem Systemzustand können jetzt nachfolgende Systemzustände abhängig der Produkthanfragen erreicht werden. In diesem Netzwerk gibt es zwei Produkte  $j$  und durch betrachten der Gleichung (4) wird klar, dass drei Optionen zum Erreichen des nachfolgenden Systemzustands zum Zeitpunkt  $t - 1 = 3$  möglich sind. Diese Optionen bilden die Kanten des Graphen. Es kann keine Anfrage nach einem Produkt  $j$  eintreffend, dann wird der nachfolgende Systemzustand  $[2 \ 1 \ 3]$  erreicht. Alternativ können Anfragen nach Produkt  $j = 1$  oder  $j = 2$  eintreffen und dementsprechend müssen die vorhandenen Kapazitäten  $\mathbf{c}$  um den Ressourcenverbrauch  $a_{11} = 1$  bzw.  $a_{22} = 1$  reduziert werden. Daraus folgt, dass der Systemzustand  $[1 \ 1 \ 3]$  bzw.  $[2 \ 0 \ 3]$  im Netzwerk erreicht werden kann.

Aufbauen auf dieser rekursiven Logik wird ein gerichteter und gewichteter Multigraph aufgebaut. Er zeigt alle möglichen Systemzustände des Netzwerks. Die Rekursion wird abgebrochen, sofern ein Systemzustand aufgrund der Grenzbedingungen aus den Gleichungen (2) oder (3) nicht möglich ist. Abbildung 5 zeigt die



möglichen Systemzustände für das eingeführte Beispiel.

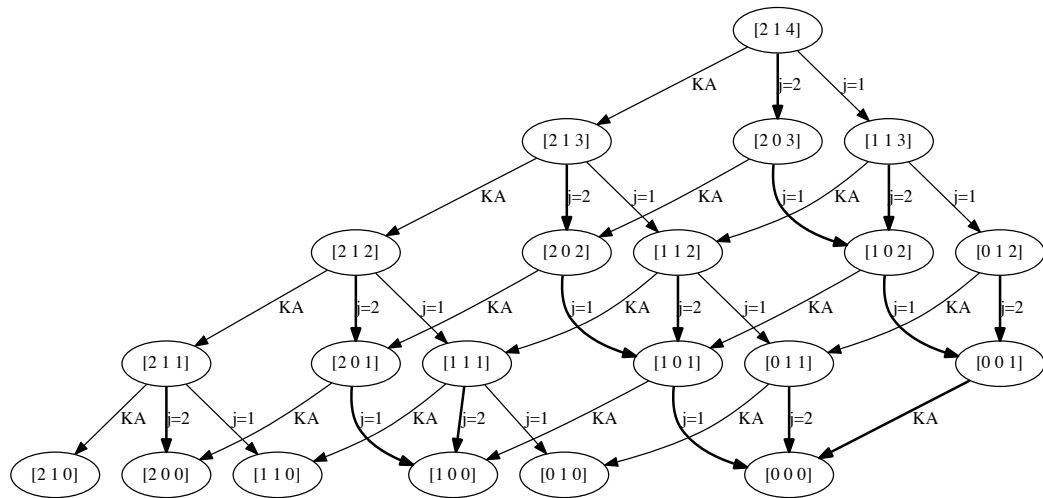


Abbildung 5 Darstellung der Systemzustände des beispielhaften Netzwerk RM

Anhand dieses Graphen mit den möglichen Systemzuständen aus der Abbildung 5 wird ersichtlich, welche Erwartungswerte für das Entscheidungsproblem der Auftragsannahme durch Rückwärtsinduktion gelöst werden müssen.<sup>23</sup> Dafür wird im ersten Schritt die Grenzbedingung aus Gleichung (2) betrachtet. Alle Systemzustände zum Zeitpunkt  $t = 0$  nehmen den Erwartungswert  $V(\mathbf{c}, t = 0) = 0$  an. Mit dieser Bedingung lassen sich die zeitlich zuvorkommenden Systemzustände mit  $t = 1$  berechnen. Es wird die Gleichung (4) angewendet, wobei beachtet werden muss, dass nicht für alle Systemzustände mit  $t = 1$  alle Produktanfragen möglich sind. Dies folgt aus der Grenzbedingung aus Gleichung (3). Zur Veranschaulichung wird der Erwartungswert des Systemzustands  $[1 \ 0 \ 1]$  mittels der Gleichung (4) berechnet.

$$\begin{aligned}
 V(1, 0, 1) &= V(1, 0, 0) + p_1(1) \max[r_1 - V(1, 0, 0) + V(0, 0, 0), 0] \\
 &\quad + p_2(1) \max[r_2 - V(1, 0, 0) + V(0, -1, 0), 0] \\
 &= 0 + 0,5 \cdot \max[100 - 0 + 0, 0] + 0,1 \cdot \max[200 - 0 + (-\infty), 0] \\
 &= 0 + 0,5 \cdot 100 + 0,1 \cdot 0 \\
 &= 50
 \end{aligned}$$

<sup>23</sup>Vgl. ???, S. ???.

Tabelle 1 Ergebnistabelle für das beispielhafte Netzwerk RM

ID	$c_1$	$c_2$	$t$	ExpValue	Successor	$j^*$	Best Successor	$r_j - OC_j$
4	2	1	4	231.25	[8 3 13]	2	8	145.8125
8	2	0	3	137.5	[17 7]	1	17	75.0
13	1	1	3	141.703125	[17 12 22]	2	17	162.0
17	1	0	2	75.0	[16 26]	1	26	50.0
22	0	1	2	38.0	[26 21]	2	26	180.0
26	0	0	1	0.0	[25]	0	25	0.0
3	2	1	3	191.6875	[2 12 7]	2	7	162.0
12	1	1	2	113.0	[16 11 21]	2	16	180.0
21	0	1	1	20.0	[25 20]	2	25	200.0
7	2	0	2	100.0	[16 6]	1	16	100.0
16	1	0	1	50.0	[25 15]	1	25	100.0
25	0	0	0	0.0	['end']	0	0	0.0
2	2	1	2	138.0	[1 11 6]	2	6	180.0
11	1	1	1	70.0	[10 20 15]	2	15	200.0
20	0	1	0	0.0	['end']	0	0	0.0
6	2	0	1	50.0	[5 15]	1	15	100.0
15	1	0	0	0.0	['end']	0	0	0.0
1	2	1	1	70.0	[0 10 5]	2	5	200.0
10	1	1	0	0.0	['end']	0	0	0.0
5	2	0	0	0.0	['end']	0	0	0.0
0	2	1	0	0.0	['end']	0	0	0.0

Nach dieser Vorgehensweise der Rückwärtsinduktion erfolgt die Ermittlung aller Erwartungswerte der möglichen Systemzustände. Tabelle 1 zeigt alle möglichen Systemzustände  $(c_1, c_2, t)$  mit den Erwartungswerten (ExpValue) und den möglichen Nachfolgern (Successor). Dabei werden die für die möglichen Systemzustände des Beispiels anhand der Spalte ID indiziert.

Zusätzlich zeigt die Tabelle den besten Auftragseingang  $j^*$  für jeden Systemzustand, sowie den daraus resultierenden Nachfolger (Best Successor) und den um die OK reduzierten Ertrag  $(r_j - OC_j)$ . Die optimale Politik  $OP_{c,t}$  lässt sich anhand der Gleichung (??) für jeden Systemzustand ermitteln. Für jede Kante des Graphens in Abbildung 5 kann damit der Ertrag abzgl. der OK hinterlegt werden  $(r_j - OC_j)$ . Die optimale Politik  $OP_{c,t}$  im betrachteten Systemzustand ist demnach die Kante bei der ein Ertrag größer gleich der OK erzielt wird. Abbildung 6 zeigt alle Systemzustände und Übergänge als Graphen mit den jeweiligen Erwartungswerten und den besten Auftragseingang für jeden Systemzustand. Dabei muss hier beachtet werden, dass alle Übergänge bzw. Entscheidungen zur optimalen Politik gehören.

??? Mit diesem Ergebnis kann eine strategische Politik abgeleitet werden. Diese

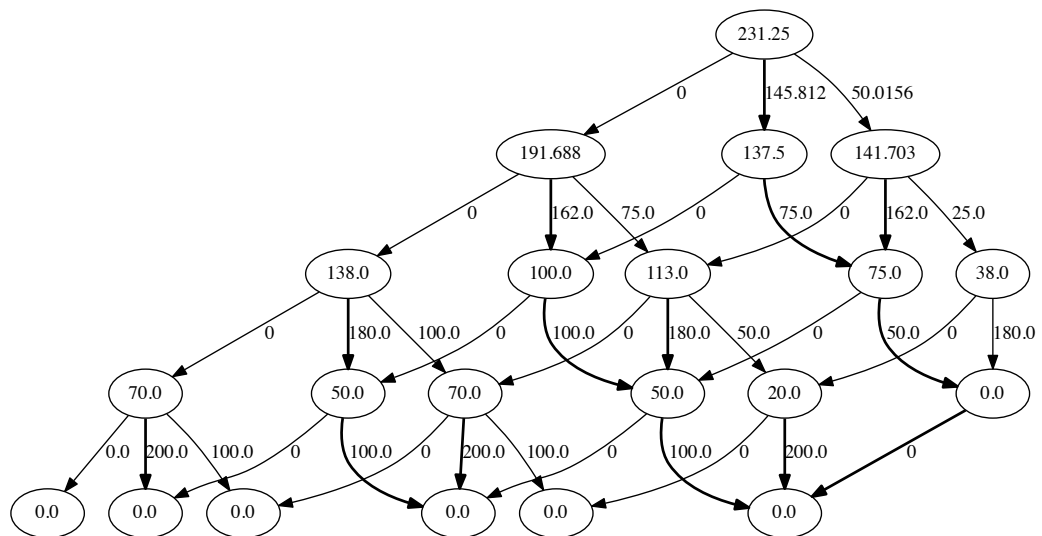


Abbildung 6 Darstellung der Systemzustände des beispielhaften Netzwerk RM (optimaler Auftragseingang)

strategische Politik kann dem Unternehmen helfen seine Instrumente der Marktbearbeitung zu optimieren. In diesem kleinen Betrachtungsfeld  $T = 4$  sollte das Unternehmen zum Zeitpunkt  $t = 4$  versuchen seine Instrumente in der Form auszurichten, dass eine Anfrage nach Produkt  $j = 2$  eintrifft. Nachfolgend sollte das Unternehmen zum Zeitpunkt  $t = 3$  und  $t = 2$  den Absatz von Produkt  $j = 1$  vorantreiben. Damit wäre der beste Pfad des Graphen gefunden ( $[2 \ 1 \ 4] \rightarrow_{j=2} [2 \ 0 \ 3] \rightarrow_{j=1} [1 \ 0 \ 2] \rightarrow_{j=1} [0 \ 0 \ 1] \rightarrow_{j=0} [0 \ 0 \ 0]$ ). Mit dem besten Pfad ist ein Ertrag in Höhe von 400 GE generiert. Bei Abweichung des Pfads in der operativen Planung der Unternehmensaktivitäten, z. B. durch nicht eintreffen der Anfrage  $j = 2$  zum Zeitpunkt  $t = 4$ , gibt das Modell einen anderen Pfad mithilfe der optimalen Politiken an. Bspw. trifft zum Zeitpunkt  $t = 4$  nur die Anfrage nach Produkt  $j = 1$  ein. Dann muss das Unternehmen seine Instrumente an den neuen Pfad anpassen ( $[2 \ 1 \ 4] \rightarrow_{j=1} [1 \ 1 \ 3] \rightarrow_{j=2} [0 \ 1 \ 2] \rightarrow_{j=1} [0 \ 0 \ 1] \rightarrow_{j=0} [0 \ 0 \ 0]$ ). Damit ist trotz der Abweichung ein Gesamtertrag von 400 GE möglich.

Anhand des Beispiels wird klar, dass die Prognose über die Wahrscheinlichkeiten des Eintreffens einer Anfrage nach den Produkten  $j \in \mathcal{J}$  die Erwartungswerte stark beeinflussen. Der potentielle Ertrag  $r_j$  und die  $OC_j$  beeinflussen maßgeblich die optimale Politik sowie den besten Auftragseingang. Dies kann durch das Abwandeln der Parameter gezeigt werden:

$$j = \{1, 2\}, h = \{1\}, r_1 = 100, r_2 = 150, T = 4$$

$$c_1 = 3, a_{11} = 1, a_{12} = 2, p_1(t) = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix}, p_2(t) = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \end{pmatrix}$$

Bei dieser Definition der Parameter konkurrieren die Typen der Produkthanfragen  $j$  mit der einzigen Ressource  $h$ . Der nachfolgende Abbildung 7 zeigt den zugehörigen Graphen mit den Systemzuständen, den möglichen Entscheidungen und der grafischen Darstellung der optimalen Politik und die Tabelle 2 zeigt die berechneten Erwartungswerte sowie besten Auftragseingang anhand des um die OK reduzierten Ertrags für jeden Systemzustand.

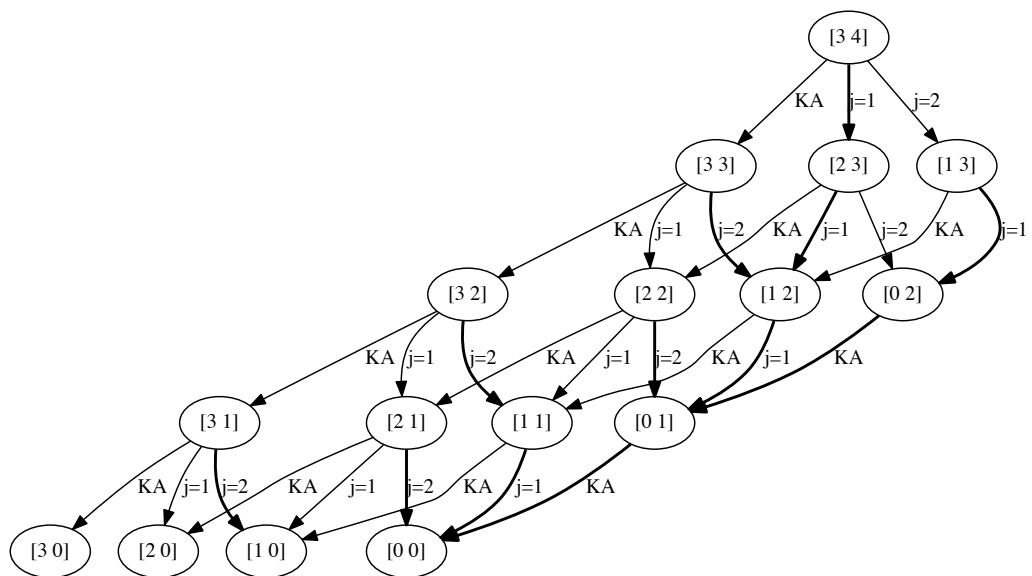


Abbildung 7 Darstellung der Systemzustände des Netzwerk RM mit konkurrierenden Anfragen

Mit dem Beispiel wird klar, dass trotz des höheren Ertrags der Produktauftrags  $j = 2$  im Systemzustand  $[3 4]$  der beste Auftrag die Annahme bzw. Vorausbuchung der Produkthanfrage  $j = 1$  ist. Aufbauend auf dieser Entscheidung ist der beste Pfad  $[3 4] \rightarrow_{j=1} [2 3] \rightarrow_{j=1} [1 2] \rightarrow_{j=1} [0 1] \rightarrow_{j=0} [0 0]$  und es wird ein Gesamtertrag von 300 GE generiert. Trifft zum Systemzustand  $[3 4]$  jedoch keine Anfrage ein ( $j = 0$ ), dann ist der beste Auftrag im Systemzustand  $[3 3]$  die Annahme der Produkthanfrage  $j = 2$ . Dies resultiert aus der Tatsache, dass die

Tabelle 2 Ergebnistabelle für das beispielhafte Netzwerk RM mit konkurrierenden Anfragen

ID	$c_1$	$t$	ExpValue	Successor	$j^*$	Best Successor	$r_j - OC_j$
4	3	4	220.96875	[8 3 13]	1	8	67.0
8	2	3	148.90625	[17 12 7]	1	12	59.0
13	1	3	87.5	[17 12]	1	17	25.0
17	0	2	0.0	[16]	0	16	0.0
3	3	3	181.90625	[2 12 7]	2	12	96.5
12	1	2	75.0	[16 11]	1	16	50.0
7	2	2	116.0	[16 11 6]	2	16	85.0
16	0	1	0.0	[15]	0	15	0.0
2	3	2	128.5	[1 11 6]	2	11	135.0
11	1	1	50.0	[10 15]	1	15	100.0
6	2	1	65.0	[10 5 15]	2	15	150.0
15	0	0	0.0	['end']	0	0	0.0
1	3	1	65.0	[0 10 5]	2	10	150.0
10	1	0	0.0	['end']	0	0	0.0
5	2	0	0.0	['end']	0	0	0.0
0	3	0	0.0	['end']	0	0	0.0

OK dem potentiellen Ertrag entgegenwirkt. Durch diese Eigenschaft gelangt das System zum Zustand [1 2] mit einem Ertrag von 150 GE. In diesem System wäre über zwei Perioden noch die Annahme einer Anfrage  $j = 1$  möglich.

!!! Mehr !!!

## 4 Bestehende Ansätze zur Annahme von Auftragsproduktion und Instandhaltungsprozessen

### 4.1 Review 1

### 4.2 Review 2

### 4.3 Review 3

### 4.4 Review 4

## 5 Ein exaktes Lösungsverfahren zur Auftragsannahme- und Lagerhaltungsentscheidung bei auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen

### 5.1 Grundlegendes zum Lösen und Implementieren des Auftragsannahmeproblems

In Kapitel 3 ist das Grundmodell des Netzwerk RM für die Annahme von Kundenanfragen als *Bellman'sche Funktionsgleichung* dargestellt. Gleichung (1) zeigt die mathematische Modellformulierung und Gleichung (4) zeigt eine Vereinfachung der Modellformulierung. In diesem Kapitel wird dieses Modellformulierung in ein Computersystem implementiert und mittels dieser Implementierung erfolgt das exakte Lösen von vordefinierten Szenarien. Dabei wird das Grundmodell mit der Entscheidung über eine mögliche Lagerhaltung erweitert. Bei der Implementierung wird in dieser Arbeit das Grundmodell mit neuen Parametern einer möglichen Lagerhaltungsentscheidung bei der Annahme von Kundenaufträgen ergänzt. Zum einen soll eine Verdeutlichung der Funktionsweise der Modellerweiterung der *Bellman'sche Funktionsgleichung* erfolgen und zum anderen wird das Ergebnis dieser Modellerweiterung für eine numerische Untersuchung verwendet.

Bei der *Bellman'sche Funktionsgleichung* (1) aus Abschnitt 3.3 handelt es um ein stochastisch-dynamisches Optimierungsproblem in rekursiver Form.<sup>8</sup> Das Optimierungsmodell besteht aus verschiedenen gleichartigen Teilproblemen und zur

---

<sup>8</sup>Vgl. ???, S. ???

Lösung des gesamten Optimierungsmodells müssen alle Teilprobleme gelöst werden.<sup>9</sup> Zur Lösung solcher rekursiven Modellformulierung wird auf das vom amerikanischen Mathematiker Richard Bellman entwickelte Konzept der **Dynamischen Programmierung (DP)** zurückgegriffen.<sup>10</sup> Bei diesem Konzept werden die berechneten Teilergebnisse gespeichert und bei der weiteren Berechnung des Optimierungsmodells verwendet.<sup>11</sup> Durch eine solche Implementierung kann die rekursive Berechnung des Modells verbessert werden, da auf bereits berechnete Teilergebnisse zurückgegriffen wird, anstelle diese neu zu berechnen.

Eine Form der Implementierung des Konzepts der DP ist das Anwenden einer *Memofunktion*. Mit der Memofunktion werden die Teilprobleme des Konstruktors des Optimierungsmodells überführt, ob diese bereits schon berechnet sind.<sup>12</sup> Bei dem Konstrukt handelt es sich um ein Graphen mit allen Teilproblemen und den einzelnen Übergängen in die nachfolgenden Teilprobleme. Zur Verdeutlichung einer Memofunktion im Netzwerk RM in der Auftragsannahme wird ein einfaches Beispiel eingeführt:  $j = \{1, 2\}$ ,  $h = \{1\}$ , Startperiode  $t = 2$ ,  $c_1 = 2$ ,  $a_{11} = 1$ ,  $a_{12} = 1$ .

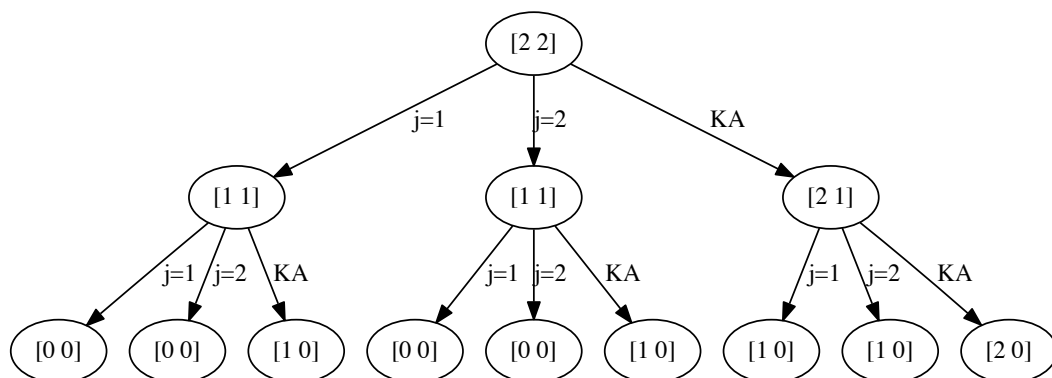


Abbildung 8 Rekursive Übergänge der Systemzustände ohne Memofunktion  
**Quelle:** ??? **Legende:** Annahme einer Produktauftrag entspricht 'j', KA='Kein Auftrag'

Abbildung 8 zeigt die möglichen Systemzustände in Form der Knoten und Übergänge in Form der Kanten. Dabei ist ein Knoten definiert als Zahlenfolge  $[c_h t]$  und zeigt damit den Kapazitätsbestand  $c_h$  zum Zeitpunkt  $t$ . Durch Annahme einer Produkthanfrage  $j \in \mathcal{J}$  oder sofern keine Anfrage eintrifft, wird ein Systemzustand verlassen. Diese rekursive Folge des Graphen wird konstruiert durch Anwenden der Gleichung (1). Sofern keine Memofunktion Anwendung findet, werden die einzelnen

<sup>9</sup>Vgl. ???, S. ???

<sup>10</sup>Vgl. ???, S. ???

<sup>11</sup>Vgl. ???, S. ???

<sup>12</sup>Vgl. ???, S. ?



Teilprobleme jeweils mehrfach ermittelt, da sie jeweils für das vorherige Teilproblem notwendig sind.

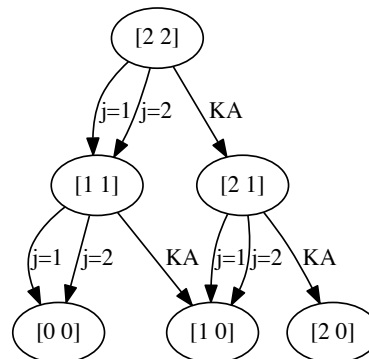


Abbildung 9 Rekursive Übergänge mit Memofunktion

Quelle: ???? Legende: Annahme einer Produktauftrag entspricht 'j', KA='Kein Auftrag'

Durch Anwenden einer Memofunktion können die möglichen Übergänge der Systemzustände des Beispiels vereinfacht werden, wie Abbildung 9 zeigt. Jedes Systemzustand ist nur einmal im Netzwerk vorhanden und sofern der rekursive Verlauf auf ein bereits ermitteltes Teilproblem trifft, erfolgt das Abrufen der bereits gespeicherten Lösung. Anders formuliert bedeutet dies, dass nachdem der Systemzustand bzw. das Teilproblem  $[1\ 1]$  aufgrund der Anfrage nach Produkt  $j = 1$  gelöst ist, die Berechnung des gleichen Systemzustands  $[1\ 1]$  aufgrund der Anfrage nach Produkt  $j = 2$  nicht mehr notwendig ist. Das Ergebnis des Teilproblems wird direkt aus der Memofunktion abgerufen.

Der in dieser Arbeit verwendete **Algorithmus** zum exakten Lösen des Auftragsannahmeproblems im Netzwerk RM verwendet eine solche Memofunktion. Der Algorithmus berechnet den Erwartungswert des maximal möglichen Ertrags für ein Netzwerk RM auf Basis der rekursiven Form der Gleichung (4). Er durchläuft alle möglichen Teilprobleme bzw. Systemzustände des Netzwerks, indem der Algorithmus sich selbst mit angepassten Parametern aufruft. Als Grenzen für die rekursive Abfolge werden die Grenzbedingungen (2) und (3) hinterlegt. Sofern eine dieser Grenzen erreicht ist bzw. die Lösungen für die notwendigen nachfolgenden Teilprobleme vorhanden sind, kann das Teilproblem gelöst werden. Somit erfolgt das Lösen des Optimierungsproblems durch Rückwärtsinduktion der rekursiven Folge, wobei bei jedem Teilproblem geprüft wird, ob bereits eine Lösung in der Memofunktion vorliegt. Nachfolgend wird der verwendete Algorithmus als Pseudocode dargestellt.

**Pseudocode: Auftragsannahmeproblem im Netzwerk RM;**

**Ermittlung des Erwartungswerts  $V(\mathbf{c}, t)$**

**Eingabe:** *Memofunktion*

**Eingabe:**  $\mathcal{J}$ ,  $\mathbf{c}$ ,  $t$  sowie  $\mathbf{a}_j$ ,  $r_j$  und  $p_j(t) \forall j \in \mathcal{J}$

**wenn**  $V(\mathbf{c}, t) \notin \text{Memofunktion}$  **dann**

**wenn**  $t \neq 0$  **dann**

$value^{reject} = V(\mathbf{c}, t - 1)$

**für jedes**  $j \in \mathcal{J}$  **tue**

**wenn**  $\mathbf{c} - \mathbf{a}_j \geq \mathbf{0}$  **dann**

$value_j^{accept} = p_j(t) \cdot \max[r_j - value^{reject} + V(\mathbf{c} - \mathbf{a}_j, t - 1), 0]$

**sonst**

                Grenzbedingung (3):  $V(\mathbf{c} - \mathbf{a}_j, t - 1) = -\infty$

$value_j^{accept} = p_j(t) \cdot \max[r_j - value^{reject} - \infty, 0]$

**Ende**

$V(\mathbf{c}, t) = value^{reject} + \sum_{j \in \mathcal{J}} value_j^{accept}$

**sonst**

        Grenzbedingung (2):  $V(\mathbf{c}, t) = 0$

$Memofunktion = Memofunktion + V(\mathbf{c}, t)$

**sonst**  $V(\mathbf{c}, t) \in Memofunktion$ ;

**Ausgabe:**  $V(\mathbf{c}, t)$

Zur Implementierung des Algorithmus zum Lösen des Grundmodells des Auftragsannahmeproblems im Netzwerk RM wird die Programmiersprache Python/2.7.1 verwendet. Es handelt sich um eine höhere Programmiersprache mit einem Interpreter.<sup>13</sup> Als Kommandozeileninterpreter wird IPython/3.2.1 genutzt. Zur Verbesserung der Laufzeit der Implementierung wird auf die Programmbibliothek NumPy/1.9.2 zurückgegriffen. Mit dieser Programmbibliothek ist es möglich multidimensionale Datenstrukturen zu formen und mit den integrierten numerischen Algorithmen sowie mathematischen Werkzeugen zu bearbeiten.<sup>14</sup> Dabei ist NumPy/1.9.2 ein Bestandteil von SciPy/0.15.1.<sup>15</sup> Die Laufzeitverbesserung kommt zu Stande, da die Funktionen der Programmbibliothek hauptsächlich in der Programmiersprache C geschrieben sind.<sup>16</sup> Zusätzlich wird die Programmbibliothek NetworkX/1.9.1 verwendet, um die ermittelten Erwartungswerte in eine Netzwerkdatenstruktur zu überführen. Diese Netzwerkdatenstruktur ist explizit für Multigraphen geeignet, was für diese Problemstellung notwendig ist. Die Teilprobleme werden miteinander in Beziehung gesetzt, indem ein Teilproblem ein Knoten bildet

<sup>13</sup>Vgl. ???, S. ??

<sup>14</sup>Vgl. ???, S. ???

<sup>15</sup>Vgl. ???, S. ??

<sup>16</sup>Vgl. ???, S. ??

und die für das Teilproblem notwendigen nachfolgenden Teilprobleme die Kanten der Netzwerkdatenstruktur bilden. Dadurch wird das Optimierungsproblem als Netzwerk interpretierbar. Weiter kann dieser Netzwerkdatenstruktur grafisch exportiert werden, indem eine für das Programm GraphViz/2.38.0 verwertbare Datei erzeugt wird. Dadurch ist das Rendern der jeweiligen Netzwerkdatenstruktur möglich. Sämtliche in dieser Arbeit abgebildeten Graphen sind mit dem Programm GraphViz/2.38.0 erstellt. Zusätzlich erfolgt die Verwaltung der Daten durch die Datenanalyse-Programmbibliothek Pandas/0.16.2. Nachfolgend wird das Grundmodell auf Basis der *Bellman'schen Funktionsgleichung* mit der Lagerhaltungsentscheidung erweitert und der hier aufgeführte Algorithmus mit den aufgeführten Erweiterungen umgeformt. Im Anschluss dieses Kapitels erfolgt die abschließende numerische Untersuchung von Szenarien....

## 5.2 Mathematische Formulierung eines Modells zur Auftragsannahme- und Lagerhaltungsentscheidung

Die Gleichung (1) wird bei Modellerweiterung der Auftragsannahme- und Lagerhaltungsentscheidung um den Parameter des Lagerbestands  $y_h$  erweitert. In Bezug des Ausgangsproblems der Lagerhaltungsentscheidung ist dieser Schritt der Modellerweiterung nötig, damit ein Parameter für bereits reparierte Produkte im Modell vorhanden ist. Es existiert für jede Ressource  $h \in \mathcal{H}$  ein möglicher Lagerbestand  $y_h$ . Die Obergrenze eines jeden Lagerbestands einer Ressource  $h \in \mathcal{H}$  wird als Parameter  $y_h^{max}$  beschrieben. Die einzelnen Lagerbestände können als Vektor  $\mathbf{y}$  zusammengefasst werden.

Die Modellerweiterung soll es ermöglichen ertragsarme Anfragen  $j^-$  nach auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen abzulehnen und eine Erhöhung des Lagerbestands  $y_h$  über des Parameters  $a_{hj}$  zu ermöglichen, sofern diese Anfragen im weiteren Verlauf des Buchungshorizonts  $T$  relevante Ressourcenkapazitäten  $c_h$  für ertragreichere Anfragen  $j^+$  reduzieren. Weiter ist eine Annahme von Anfragen  $j$  nach Instandhaltungsprozessen über den Lagerparameter  $y_h$  möglich, indem anstelle der Kapazitätsreduktion eine Lagerreduktion erfolgt. Der Parameter  $y_h$  wird bei der Annahme via Lagerbestand um den Parameter  $a_{hj}$  reduziert. Damit fungiert in diesem Modell der Parameters  $a_{hj}$  als Bestandsveränderung der Kapazitäten oder

der Lagerbestände.

In der Modellerweiterung werden Anfragen nach Produkten betrachtet, die für bestimmte Leistungserstellungszeitpunkte vorgesehen sind. Ein Leistungserstellungszeitpunkt wird durch den Parameter  $\hat{t}$  definiert. Damit existiert für eine jede Ressourcen  $h$  eine Kapazität  $c_h$  und ein Lagerbestand  $y_h$  für einen jeden Leistungserstellungszeitpunkt  $\hat{t}$ . Den Parametern  $c_h$  und  $y_h$  kann der hochgestellte Index zum zugehörigen Buchungsabschnitt  $\hat{t}$  ergänzt werden. Zur Vereinfachung des Modells wird jedoch nur eine einzelne Ressource  $h$  über den gesamten Buchungshorizont betrachtet. Damit gilt  $c_{h=\hat{t}}$ . Der jeweilige Eintrag im Vektor  $\mathbf{c}$  entspricht somit der Kapazität  $c_h$  der Ressource  $h$  zum Leistungserstellungszeitpunkt  $\hat{t}$ .

Der Kapazitätsverbrauch  $a_j$  einer Produktanfrage  $j$  beschreibt mit dem jeweiligen Eintrag für die Ressource  $h$  damit den Zeitpunkt der Erfüllung der Anfrage. Sei  $\tilde{j}$  eine Anfrage nach einem Produkt für diese Modellerweiterung, dann beschreibt der Parameter  $\mathbf{a}_{\tilde{j}} = (0, 1, 0)$ , dass die Erfüllung der Anfrage für den Leistungserstellungszeitpunkt  $\hat{t} = 2$  vorgesehen ist. Die bis zur Leistungserstellung benötigten Perioden können ermittelt werden durch Division des Buchungshorizonts  $T$  und der Anzahl an Leistungszeitpunkten  $\hat{t}$ . Wobei  $T$  durch die Anzahl der Leistungszeitpunkten  $\hat{t}$  ganzzahlig teilbar sein muss. Daher wird bei dieser Modellerweiterung strikt ein Buchungshorizont gewählt, der in Fünfer-Schritten den nächsten Zeitpunkt der Leistungserstellung vorsieht. Sofern für eine Anfrage  $j$  mit einem Kapazitätsverbrauch  $\mathbf{a}_{\tilde{j}} = (0, 1, 0)$  ein Buchungshorizont von  $T = 15$  vorgesehen ist, dann erfolgt die Leistungserstellung der Anfrage  $j$  mit Ablauf der sechsten Periode  $t$ .

Das Modell erlaubt die vorzeitige Inanspruchnahme von Kapazitäten  $c_h$  für Anfragen  $j$  für nachfolgende Leistungserstellungszeitpunkte  $\hat{t}$ , was die Annahme der Instandhaltungsauftrags oder das Instandsetzen von Ressourcen entspricht. Dies resultiert aus der Tatsache, dass die Bestandsveränderung  $\mathbf{a}_j$  einer Anfrage  $j$  bereits vor des eigentlichen Leistungserstellungszeitpunkts  $\hat{t}$  den Zugriff auf die Kapazität  $c_j$  oder den Lagerbestand  $y_j$  erlaubt. Jedoch darf kein Zugriff des Parameters  $\mathbf{a}_j$  nach Überschreitung des Leistungserstellungszeitpunkts  $\hat{t}$  auf die jeweiligen Bestände  $\mathbf{c}$  bzw.  $\mathbf{y}$  erfolgen. Anders formuliert bedeutet dies, dass nicht beanspruchte Kapazitäten  $c_h$  für vergangene Leistungserstellungszeitpunkte  $\hat{t}$  nicht mehr für weitere Auftragsannahme verwendet werden dürfen. Diese Eigenschaft wird mit der Wahrscheinlichkeit  $p_j(t)$  für die jeweiligen Anfragen  $j$  gesteuert. Dabei ist der Zeitpunkt an dem die erste Anfrage nach einem Produkt  $j$  unerheblich. Abbildung 10 zeigt die Rahmenbedingungen der Modellerweiterung als grafische Darstellung.

Dabei soll der Zusammenhang von Buchungsperioden und Leistungserstellungszeitpunkte verdeutlicht werde, aber auch aufgezeigt werden, welche Produkthanfragen in welchen Zeiträumen eintreffen können.

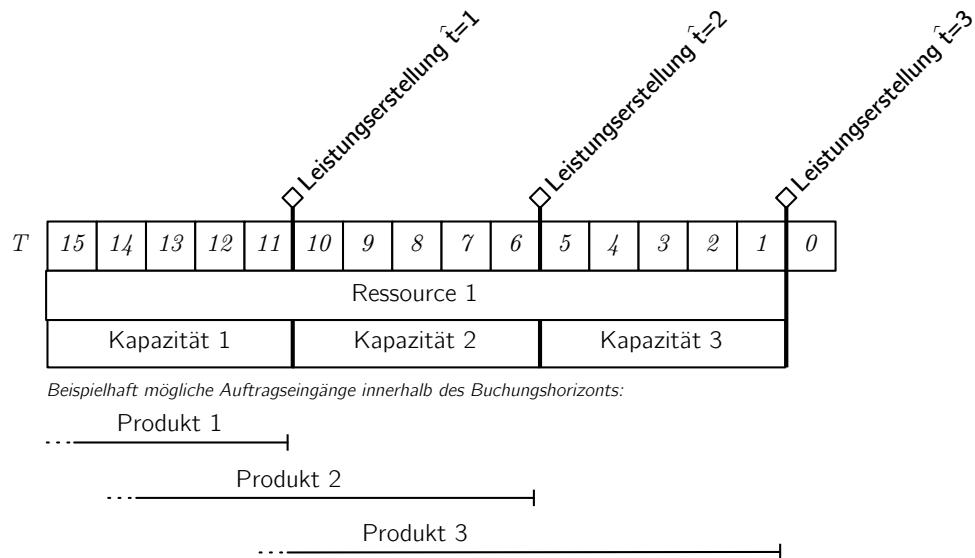


Abbildung 10 Zusammenhang von Buchungsperioden und den Buchungsabschnitten  
In Anlehnung an: ????

Bei der Modellformulierung erfolgt die Anpassung der *Bellman'schen Funktionsgleichung* (1) um die Lagerentnahme in Form des Terms  $r_j + V(\mathbf{c}, \mathbf{y} - \mathbf{a}_j, t - 1)$ . Der Term beschreibt die Annahme mittels des Lagerbestands. Damit ist es dem Unternehmen möglich entweder die Kapazität oder den Lagerbestand zur Annahme einer Anfrage eines Instandhaltungsprozess in Anspruch zu nehmen. Die gewollte Ablehnung einer Anfrage  $j$  zur Aufarbeitung einer Ressource  $h$  für den Lagerbestand  $y_h$  wird mit dem Term  $V(\mathbf{c} - \mathbf{a}_j, \mathbf{y} + Y(\mathbf{a}_j), t - 1)$  dargestellt. Damit ist dem Modell die Entscheidung über die Ablehnung einer Anfrage  $j$  gestattet, wobei bei dieser Ablehnung der Anfrage eine Reduktion der Ressourcenkapazität  $\mathbf{c}$  und die Erhöhung des Lagerbestand  $\mathbf{y}$  um jeweils des Parameters  $\mathbf{a}_j$  einhergeht. Die Erhöhung des Lagerbestands  $\mathbf{y}$  einer jeden Ressource  $h$  erfolgt über den gesamten Buchungshorizont. Sei der aktuelle Lagerbestands  $\mathbf{y} = (0, 0, 0)$  über alle Leistungserstellungszeitpunkte  $\hat{t}$ , wobei aufgrund der Vereinfachung des Modells  $h = \hat{t}$  entspricht. Dann erfolgt durch die Annahme einer Anfrage  $j$  mit der Bestandsveränderung  $\mathbf{a}_j$  eine Erhöhung des Lagerbestand auf  $\mathbf{y} = (0, 1, 1)$ , da die Leistung erst nach Erstellung in  $\hat{t} = 1$  verfügbar ist.

Zur Ermittlung des Lagerbestands aufgrund der Annahme der Aufarbeitung von Ressourcen ist die Hilfsfunktion  $Y(\mathbf{a}_j)$  erforderlich, die den Parameter für den

Kapazitätsverbrauch  $\mathbf{a}_j$  über alle nachfolgenden Leistungserstellungszeitpunkten kumuliert.<sup>17</sup> Als Beispiel wird der Kapazitätsverbrauch  $\mathbf{a}_j = (0, 1, 1, 0)$  betrachtet. Ein Auftrag  $j$  mit einem Verbrauch des vorher aufgeführten Parameters  $\mathbf{a}_j$  zeigt eine Leistungserstellung über mehrere Perioden auf. Die Hilfsfunktion zur Ermittlung der Lagerbestandsveränderung berechnet damit eine Lageraufstockung in Höhe des Vektors  $Y(\mathbf{a}_j) = (0, 0, 1, 2)$ . Es muss beachtet werden, dass ein Auftrag  $j$  mit einem Kapazitätsverbrauch von  $\mathbf{a}_j = (0, 0, 1, 2)$  eine Lagererhöhung  $Y(\mathbf{a}_j) = (0, 0, 0, 1)$  verursacht. Diese Erhöhung liegt außerhalb des Betrachtungszeitraums. Damit kann zwar ein Teil der Bestandsveränderung für den aktuellen Betrachtungszeitraum genutzt werden, aber der andere Teil geht in dieser Modellformulierung verloren. Eine zusätzliche Betrachtung einer Beanspruchung von Beständen außerhalb des Betrachtungszeitraums (Perioden  $t \leq 0$ ) in Form von z. B. Lagerentnahmen findet in dieser Arbeit keine Anwendung.

Die mathematische Formulierung der *Bellman'schen Funktionsgleichung* für Auftragsannahme- und Lagerhaltungsentscheidungen bei auftragsbezogenen Instandhaltungsprozessen wird damit wie folgt beschrieben:

$$\begin{aligned}
 V(\mathbf{c}^{\hat{t}}, \mathbf{y}^{\hat{t}}, t) &= \sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t) \max[V(\mathbf{c}^{\hat{t}}, \mathbf{y}^{\hat{t}}, t-1), \\
 &\quad r_j + V(\mathbf{c}^{\hat{t}} - \mathbf{a}_j, \mathbf{y}^{\hat{t}}, t-1), \\
 &\quad r_j + V(\mathbf{c}^{\hat{t}}, \mathbf{y}^{\hat{t}} - \mathbf{a}_j, t-1), \\
 &\quad V(\mathbf{c}^{\hat{t}}, \mathbf{y}^{\hat{t}} + Y(\mathbf{a}_j), t-1)] \\
 &\quad + p_0(t)V(\mathbf{c}^{\hat{t}}, \mathbf{y}^{\hat{t}}, t-1) \\
 &= V(\mathbf{c}^{\hat{t}}, \mathbf{y}^{\hat{t}}, t-1) + \sum_{j \in \mathcal{J}} p_j(t) [\max[0, \\
 &\quad r_j - V(\mathbf{c}^{\hat{t}}, \mathbf{y}^{\hat{t}}, t-1) + V(\mathbf{c}^{\hat{t}} - \mathbf{a}_j, \mathbf{y}^{\hat{t}}, t-1), \\
 &\quad r_j - V(\mathbf{c}^{\hat{t}}, \mathbf{y}^{\hat{t}}, t-1) + V(\mathbf{c}^{\hat{t}}, \mathbf{y}^{\hat{t}} - \mathbf{a}_j, t-1), \\
 &\quad V(\mathbf{c}^{\hat{t}} - \mathbf{a}_j, \mathbf{y}^{\hat{t}} + Y(\mathbf{a}_j), t-1) - V(\mathbf{c}^{\hat{t}}, \mathbf{y}^{\hat{t}}, t-1)]]
 \end{aligned} \tag{8}$$

Wie in der Gleichung 8 zu erkennen ist, gibt es zu jedem Erwartungswert der rekursiven Folge, somit für jedes Teilproblem des Netzwerks, für eine jede Anfrage  $j$  die Optionen der Auftragsannahme via Kapazitäten oder via Lagerbestand sowie die Optionen der Auftragsablehnung mit und ohne der Aufarbeitung von Ressourcen. Zu beachten ist jedoch, dass das Eintreffen einer Anfrage  $j$  abhängig der Wahr-

<sup>17</sup>Vgl. Lars

scheinlichkeit  $p_j(t)$  ist. Zusätzlich gibt es immer einen Systemübergang, sofern keine Anfragen eintreffen. Es gibt damit für eine jede Produkthanfrage eine Option bzw. Entscheidung, um was für eine Art der optimale Politik es sich handelt. Diese Option der optimalen Politik wird als Parameter  $d_j^{\mathbf{c}, \mathbf{y}, t}$  definiert und ist abhängig des aktuellen Systemzustands bzw. der Parameter  $\mathbf{c}, \mathbf{y}$  und  $t$ . Der Parameter kann ebenfalls als Vektor  $\mathbf{d}^{\mathbf{c}, \mathbf{y}, t}$  interpretiert werden. Inhalt des Vektors ist der jeweilige Index der optimalen Option bzw. Politik. Es nimmt den Wert  $d_j^{\mathbf{c}, \mathbf{y}, t} = 1$  an, sofern die Option der Auftragsannahme via Kapazität den höchsten Erwartungswert  $t - 1$  liefert und den Wert  $d_j^{\mathbf{c}, \mathbf{y}, t} = 2$ , wenn die Auftragsannahme via Lagerbestand der optimalen Politik entspricht. Sofern die Ablehnung des Auftrags erfolgen soll, aber inkl. der Entscheidung der Aufarbeitung der Ressourcen, dann nimmt der Parameter  $d_j^{\mathbf{c}, \mathbf{y}, t}$  den Wert 3 an. Sofern keine Anfrage akzeptiert werden soll, nimmt der Parameter den Wert  $d_j^{\mathbf{c}, \mathbf{y}, t} = 0$  an.

Für die verschiedenen Optionen existieren unterschiedliche  $OC_j$ , wie aus der Gleichung (8) zu erkennen ist. Damit trägt der Parameter  $OC_j$  den Superskript  $d$  für die jeweilig möglichen Optionen aufgrund der Modellformulierung. In dieser Modellerweiterung existieren vier unterschiedliche Optionen, die den möglichen Ausprägungen der optimalen Politiken des Parameters  $d_j^{\mathbf{c}, \mathbf{y}, t}$  entsprechen. Sofern die Entscheidung über die verschiedenen möglichen Optionen im betrachteten Systemzustand gleichwertig sind, welches abhängig von den Parametern  $r_j$  und  $OC_j^d$  ist, wird die Annahme einer Anfrage über die Ressourcenkapazität bevorzugt. Anschließend erfolgt die Bevorzugung der Annahme einer Anfrage via Lagerbestand, falls die anderweitigen Optionen einen gleichwertigen Wert aufweisen.

Es gelten die Grenzbedingungen (2) sowie (3) aus Kapitel 3 und bzgl. der optimalen Politik gilt folgende Annahme:

$$d_j^{\mathbf{c}, \mathbf{y}, t} := \begin{cases} 1, & \text{für } r_j - OC_j^1 \geq r_j - OC_j^2 \\ 2, & \text{für } r_j - OC_j^2 \geq OC_j^3 \\ 3, & OC_j^3 > 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} . \quad (9)$$

Die Beschreibung der Funktionsweise der Modellerweiterung wird anhand nachfolgendem Beispiels getätigt:

$$j = \{1, 2, 3, 4\}, \quad h^t = \{1\}, \quad r_1 = 100, \quad r_2 = 5000, \quad r_3 = 100, \quad r_4 = 5000,$$

Startperiode  $t = 10$ ,  $\hat{T} = \{1 : \{10, 9, 8, 7, 6\}, 2 : \{5, 4, 3, 2, 1\}\}$ ,

$$\mathbf{c}^{\hat{t}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$p_j(t) = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{y}^{\hat{t}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{y}^{\hat{t},max} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Für dieses Beispiel ist eine grafische Auswertung unter Beachtung der Parameter und der Menge an möglichen Systemübergängen nicht mehr möglich. Eine Auswertung der optimalen Politik anhand der Tabelle 3 ist jedoch weiterhin möglich. Die Tabelle zeigt die jeweiligen Erwartungswerte und die optimalen Politik für jeden Systemzustand. Dabei wird in diesem Beispiel ein Systemzustand als Zahlenfolge  $[c_1^{\hat{t}} c_2^{\hat{t}} y_1^{\hat{t}} y_2^{\hat{t}} t]$  definiert.

Wie aus der Tabelle 3 zu erkennen ist, ermittelt der Algorithmus keine optimale Politik der Instandsetzung von Lagerbeständen für die Aufträge  $j = 3$  und  $j = 4$ . Dies liegt daran, dass die Bereitstellung des aufgewerteten Lagerbestands erst außerhalb des Buchungshorizonts  $T$  verfügbar ist. Zur Buchungsperiode  $t = 10$  gehört für dieses Netzwerk eine Annahme der Auftrags der jeweils ertragsarmen Anfragen  $j = 1$  und  $j = 3$  nicht zur optimalen Politik. Jedoch kann die Kapazität  $c_{h^{\hat{t}}}^{\hat{t}}$  zur Periode  $t = 10$  genutzt werden, dass ein Lagerbestand  $y_{h^{\hat{t}}}^{\hat{t}}$  für die Ressource  $h^{\hat{t}}$  generiert wird. Erfolgt zum Zeitpunkt  $t = 10$  der Auftragseingang von  $j = 1$ , dann ist eine Annahme über die Kapazitäten nicht die optimale Politik, sondern die Ablehnung und die Lagerhaltungsentscheidung. D. h. der Kapazitätsverbrauch  $\mathbf{a}_j$  der Anfrage  $j$  wird aufgewendet um den Lagerbestand um  $Y(\mathbf{a}_j)$  zu erhöhen.

Die Dominanz der Annahmen von  $j = 2$  bzw.  $j = 4$  wird über das gesamte Netzwerk beibehalten, sofern die Wahrscheinlichkeit des Auftragseingangs besteht. Zum Zeitpunkt  $t = 5$  können die Kapazitäten vom Leistungszeitpunkt  $\hat{t} = 1$  nicht mehr abgerufen werden, was zum Beispiel für den Systemzustand  $[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 5]$  bedeutet, dass keine Auftragsannahmen oder Lagerungen von Produkten möglich sind.



Tabelle 3 Optimale Politik für das beispielhafte Netzwerk RM unter Beachtung  
von Produktanfragen für nachfolgende Buchungsabschnitte

ID	$c^1$	$c^2$	$y^1$	$y^2$	$t$	ExpValue	$j_{AA}^1$	$j_{AA}^2$	$j_{AA}^3$	$j_{AA}^4$	$j_{LE}^1$	$j_{LE}^2$	$j_{LE}^3$	$j_{LE}^4$	$j_{IH}^1$	$j_{IH}^2$
33	1	1	0	0	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	1	1	0	0	1	1020.0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
35	1	1	0	0	2	1816.0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
36	1	1	0	0	3	2453.0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
37	1	1	0	0	4	2962.5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
38	1	1	0	0	5	3370.0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
39	1	1	0	0	6	6064.0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1
40	1	1	0	0	7	7790.0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1
41	1	1	0	0	8	9008.0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1
42	1	1	0	0	9	9917.0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1
43	1	1	0	0	10	10734.5	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
66	1	0	0	1	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	1	0	0	1	1	1020.0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
68	1	0	0	1	2	1816.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
69	1	0	0	1	3	2453.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
70	1	0	0	1	4	2962.5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
71	1	0	0	1	5	3370.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
72	1	0	0	1	6	4716.0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
73	1	0	0	1	7	6042.5	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
74	1	0	0	1	8	7184.0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
75	1	0	0	1	9	8111.75	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
77	1	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78	1	0	0	0	1	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
79	1	0	0	0	2	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	1	0	0	0	3	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
81	1	0	0	0	4	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
82	1	0	0	0	5	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
83	1	0	0	0	6	2368.0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
84	1	0	0	0	7	3833.5	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
85	1	0	0	0	8	4842.75	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
86	1	0	0	0	9	5584.703125	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
88	0	1	1	1	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
89	0	1	1	1	1	2040.0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
90	0	1	1	1	2	3632.0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
91	0	1	1	1	3	4906.0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
92	0	1	1	1	4	5925.0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
93	0	1	1	1	5	6740.0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
94	0	1	1	1	6	8412.0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0
95	0	1	1	1	7	9729.75	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
96	0	1	1	1	8	10783.875	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
97	0	1	1	1	9	11626.75	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
99	0	1	1	0	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	1	1	0	1	1020.0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
101	0	1	1	0	2	1816.0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
102	0	1	1	0	3	2453.0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
103	0	1	1	0	4	2962.5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
104	0	1	1	0	5	3370.0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
105	0	1	1	0	6	4716.0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
106	0	1	1	0	7	5772.75	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
107	0	1	1	0	8	6618.47509766	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
110	0	1	0	1	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
111	0	1	0	1	1	2040.0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
112	0	1	0	1	2	3632.0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
113	0	1	0	1	3	4906.0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
114	0	1	0	1	4	5925.0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
115	0	1	0	1	5	6740.0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0

## 5.3 Numerische Untersuchung

## 6 Schlussbemerkung

## Anhang

## Literaturverzeichnis

- Bach, N.; Brehm, C.; Buchholz, W. und Petry, T. (2012): Wertschöpfung als zentrales Ziel von Unternehmensführung. Gabler Verlag. S. 1–25.
- Bellman, R. (1954): The theory of dynamic programming. Arbeitspapier. DTIC Document.
- Corsten, H. und Stuhlmann, S. (1998): Yield Management: Ein Ansatz zur Kapazitätsplanung und-steuerung in Dienstleistungsunternehmen. In: Schriften zum Produktionsmanagement. Bd. 18.
- Corsten, H. und Stuhlmann, S. (1999): Yield Management als Ansatzpunkt für die Kapazitätsgestaltung von Dienstleistungsunternehmen. In: Wettbewerbsfaktor Dienstleistung: Produktion von Dienstleistungen-Produktion als Dienstleistung, Vahlen, München, S. 79–107.
- Daudel, S. und Vialle, G. (1992): Yield-Management: Erträge optimieren durch nachfrageorientierte Angebotssteuerung. Campus-Verlag.
- Dickersbach, J. (2004): Production Planning. In: Supply Chain Management with APO. Springer Berlin Heidelberg, S. 131–234.
- Dyckhoff, H. und Spengler, T.S. (2010): Springer-Lehrbuch. Bd. 0. Springer Berlin Heidelberg. S. 3–11.
- Fleischmann, B. und Meyr, H. (2004): Customer Orientation in Advanced Planning Systems. In: H. Dyckhoff; R. Lackes und J. Reese (Hrsg.), Supply Chain Management and Reverse Logistics. Springer Berlin Heidelberg, S. 297–321.
- Friege, C. (1996): Yield-Management. In: WiSt–Wirtschaftswissenschaftliches Studium. Bd. 25, S. 616–622.

- Goetschalckx, M. und Fleischmann, B. (2005): Strategic network planning. In: Supply chain management and advanced planning. Springer, S. 117–137.
- Gutenberg, E. (1959): Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft. Springer Berlin Heidelberg. S. 34–74.
- Gutenberg, E. (1965): Die dispositiven Faktoren. In: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Abteilung Staatswissenschaft. Springer Berlin Heidelberg, S. 130–285.
- Hax, K. (1956): Industriebetrieb. In: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Stuttgart ua.
- Helbing, K. (2010): Instandhaltung. In: Handbuch Fabrikprojektierung. Springer Berlin Heidelberg, S. 983–989.
- Hinsch, M. (2010): Instandhaltung. In: Industrielles Luftfahrtmanagement. Springer Berlin Heidelberg, S. 189–221.
- Hintsches, A.; Spengler, T.S.; Volling, T.; Wittek, K. und Priegnitz, G. (2010): Revenue management in make-to-order manufacturing: case study of capacity control at ThyssenKrupp VDM. In: BuR-Business Research. Bd. 3, Nr. 2, S. 173–190.
- Kimes, S.E. (1989b): Yield management: a tool for capacity-considered service firms. In: Journal of operations management. Bd. 8, Nr. 4, S. 348–363.
- Kimms, A. und Klein, R. (2005): Revenue Management im Branchenvergleich. Arbeitspapier. Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL).
- Klein, R. (2001): Revenue Management: Quantitative Methoden zur Erlösmaximierung in der Dienstleistungsproduktion. Arbeitspapier. Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL).
- Klein, R. und Steinhardt, C. (2008): Revenue Management : Grundlagen und mathematische Methoden. Springer, Berlin [u.a.].

- Kolisch, R. und Zatta, D. (2006): Revenue-Management in der Sachgüterproduktion. In: Marketing Journal. Bd. 12, S. 38–41.
- von Martens, T. (2009): Kundenwertorientiertes Revenue Management im Dienstleistungsbereich. Gabler, Wiesbaden, 1. Aufl.. Aufl.
- Meyr, H.; Wagner, M. und Rohde, J. (2015): Structure of advanced planning systems. In: Supply chain management and advanced planning. Springer, S. 99–106.
- Petrack, A. (2009): Multimodale Produkte im Revenue Management : Potenziale und Ansätze zur Realisierung einer Kapazitätssteuerung. Südwestdeutscher Verl. für Hochschulschriften, Saarbrücken.
- Quante, R. (2009): Management of stochastic demand in make-to-stock manufacturing. Bd. 37. Peter Lang.
- Rohde, J. und Wagner, M. (2002): Master Planning. In: H. Stadtler und C. Kilger (Hrsg.), Supply Chain Management and Advanced Planning. Springer Berlin Heidelberg, S. 143–160.
- Ryll, F. und Freund, C. (2010): Grundlagen der Instandhaltung. In: M. Schenk (Hrsg.), Instandhaltung technischer Systeme. Springer Berlin Heidelberg, S. 23–101.
- Schmidt, G. (2012): Grundlagen betriebswirtschaftlicher Prozesse. Springer Berlin Heidelberg. S. 1–29.
- Schmidt, S. (2009): Komplexe Produkte und Systeme. In: Die Diffusion komplexer Produkte und Systeme. Gabler, S. 77–121.
- Spengler, T. und Rehkopf, S. (2005): Revenue Management Konzepte zur Entscheidungsunterstützung bei der Annahme von Kundenaufträgen. In: Zeitschrift für Planung und Unternehmenssteuerung. Bd. 16, Nr. 2, S. 123–146.
- Spengler, T.; Rehkopf, S. und Volling, T. (2007): Revenue management in make-to-order manufacturing—an application to the iron and steel industry. In: . Bd. 29, Nr. 1, S. 157–171.
- Stadtler, H. (2008): Purchasing and Material Requirements Planning. In: H. Stadt-

- ler und C. Kilger (Hrsg.), Supply Chain Management and Advanced Planning. Springer Berlin Heidelberg, S. 217–229.
- Strunz, M. (2012): Gegenstand, Ziele und Entwicklung betrieblicher Instandhaltung. Springer Berlin Heidelberg. S. 1–35.
- Stuhlmann, S. (2000): Kapazitätsgestaltung in Dienstleistungsunternehmen: eine Analyse aus der Sicht des externen Faktors. Deutscher Universitäts-Verlag.
- Talluri, K. und van Ryzin, G.J. (2004): Revenue management under a general discrete choice model of consumer behavior. In: Management Science. Bd. 50, Nr. 1, S. 15–33.
- Talluri, K.T. und van Ryzin, G.J. (2004b): The Theory and Practice of Revenue Management. International Series in Operations Research and Management Science, vol. 68. Springer.
- Tempelmeier, H. und Günther, H.O. (1994): Produktion und Logistik. Springer.
- Thaler, K. (2001): Supply chain management: Prozessoptimierung in der logistischen Kette. Fortis-Verlag.
- Weatherford, L.R. (1998): A tutorial on optimization in the context of perishable-asset revenue management problems for the airline industry. In: Operations Research in the airline industry. Springer, S. 68–100.
- Weatherford, L.R. und Bodily, S.E. (1992): A taxonomy and research overview of perishable-asset revenue management: yield management, overbooking, and pricing. In: Operations Research. Bd. 40, Nr. 5, S. 831–844.
- Zehle, K.O. (1991): Yield-Management–Eine Methode zur Umsatzsteigerung für Unternehmen der Tourismusindustrie. In: Tourismusmanagement und-marketing. Landsberg/Lech: Moderne Industrie, S. S. 483–504.



## Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Hannover, 11. September 2015

