



Hochschule  
Bonn-Rhein-Sieg  
University of Applied Sciences



## Masterarbeit

im Studiengang *Master of Computer Science*

# Modellierung einer online Überwachung und Steuerung von Ressourcen im Kommissionierprozess

vorgelegt von: Oleksandr Tokunov

Fachbereich: Informatik

Erstgutachter: Prof. Dr. Kurt-Ulrich Witt

Zweitgutachter: Prof. Dr. Peter Becker

© 2014

Dieses Werk einschließlich seiner Teile ist **urheberrechtlich geschützt**. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Problemstellung . . . . .	1
1.2 Fragestellung . . . . .	2
1.3 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit . . . . .	2
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Modellierung eines Prozesses</b>	<b>4</b>
2.1 Grundlegende Komponenten . . . . .	4
2.2 Aktueller Status und die Zielfunktion . . . . .	5
<b>3 Adaption des Modells an einen Kommissionierprozess</b>	<b>7</b>
3.1 Zeitliche Faktoren . . . . .	8
3.2 Echtzeit-Überwachung mittels Zustandsermittlung . . . . .	9
3.3 Modell: Kommissionierprozess . . . . .	10
<b>4 Ressourcenmanagement</b>	<b>11</b>
4.1 Aktuell benötigte Ressourcen . . . . .	11
4.2 Bedingungen für die Ressourcenneuverteilung . . . . .	13
4.3 Ressourcenklassifizierung . . . . .	14
4.4 Konkrete Vorschläge . . . . .	16
<b>5 Ausblick auf weitere Optimierungen</b>	<b>19</b>
5.1 Globaler Status . . . . .	19
5.2 $m : n$ Klassenbeziehung für Ressourcen . . . . .	21
5.3 Ressourcenzusammenstellung für neue Prozesse . . . . .	23
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>24</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>25</b>

## **Abkürzungsverzeichnis**

bzw. ....	beziehungsweise
ggf. ....	gegebenenfalls
u. a. ....	unter Anderem
z. B. ....	zum Beispiel

## **Abbildungsverzeichnis**

3.1	Arbeitsschritt eines Kommissionierprozesses . . . . .	7
4.1	Algorithmus zur Ermittlung eines Lösungsvorschlags . . . . .	17

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Problemstellung

Prozesse bezeichnen meist einen initiierten Verlauf von Aktivitäten, die zu einem Endzustand führen. Somit ergeben sich drei Faktoren, welche für einen Prozess relevant sind:

- *Initiierung des Prozesses*: dies kann beispielsweise durch einen Auftrag des Kunden repräsentiert werden
- *Aktivitäten*: einzelne Vorgänge, um die gestellten Anforderungen/Zustände zu erreichen
- *Endzustand*: das resultierende Ergebnis der getätigten Aktivitäten

Die Initiierung und der Endzustand sind in der Regel fest und können nicht verändert werden. Somit liegt der Fokus auf der Planung der Aktivitäten. Die Aktivitäten erfordern meist bestimmte Ressourcen, welche die geplanten Tätigkeiten ausführen bzw. vordefinierten Zustände annehmen. In den meisten Fällen steht nur eine begrenzte Menge an Ressourcen zur Verfügung.

Die Verwaltung von zur Verfügung stehenden Ressourcen hat eine wichtige Bedeutung, wenn ein gewünschter oder erforderlicher Endzustand erreicht werden soll. Gerade in zeitkritischen Prozessen stellen Ressourcen einen limitierenden Faktor dar. Müssen mehrere Aufträge zu bestimmten Zeitpunkten erledigt werden, so wird in der Planung eine bestmögliche Aufteilung der für die Bearbeitung benötigten Ressourcen mittels fachspezifischen Methoden ermittelt. Allerdings kann es unter realen Bedingungen durchaus zu Abweichungen kommen, woraus sich entsprechende zeitliche Verzögerungen resultieren würden. Dies kann dazu führen, dass die für die Einhaltung des Zeitplans ermittelte Ressourcenaufteilung nicht mehr aktuell ist. Es entsteht also ein Risiko, dass die Aufträge nicht mehr pünktlich zu den vorgegebenen Zeiten erledigt werden können. Es ist also wichtig ein solches Risiko rechtzeitig zu erkennen und ggf. die Ressourcen so aufzuteilen, dass der Zeitplan unter aktuellen Bedingungen doch noch eingehalten werden kann. Gerade wenn die Ressourcen nicht technischer Natur sind, sondern menschliche Fachkräfte repräsentieren, ist dieses Szenario sehr aktuell.

Im Bereich der Logistik finden sich diverse Prozesse solcher Art, welche vor allem zeitkritisch sind. Die Pünktliche und schnellstmögliche Zustellung der geforderten Ware hat in dieser Branche eine sehr hohe Priorität. Es ist beispielsweise von der korrekten Aufteilung der Kommissionierer abhängig, ob die Lieferungen für bestimmte Aufträge pünktlich zum Abholzeitpunkt fertig kommissioniert werden. Da hier menschliche Fachkräfte (Kommissionierer) als Ressourcen für die Bereitstellung der Aufträge angesehen werden, ist die Wahrscheinlichkeit der Verzögerung erhöht. Solch eine Verzögerung kann sowohl für den Lieferanten, als auch Dienstleister (Transport) und letztlich für den Endkunden negative Auswirkungen haben. Außerdem wird das Risiko der Verzögerung folgender Aufträge ebenfalls stark erhöht.

### 1.2 Fragestellung

In dieser Arbeit gilt es zu untersuchen wie ein solch zeitkritisches Problem algebraisch beschrieben werden kann. Hierfür müssen zunächst die einzelnen Faktoren ermittelt werden, welche den Prozess definieren, sowie Variablen, welche sich zur Laufzeit ändern und somit das Ergebnis entsprechend beeinflussen können. Außerdem soll die Fragestellung untersucht werden, wie eine permanente Überwachung (Auswertung) realisiert werden kann, um mögliche Abweichungen von dem vorgegebenen Ziel rechtzeitig zu erkennen.

### 1.3 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Modell ausgearbeitet werden, welches mittels der aktuellen Daten eine dauerhafte Überwachung bestimmter Prozesse durchführt und mögliche Risiken der Nichteinhaltung von vorgegebenen Zielen (z. B. zeitlicher Rahmen) erkennt. Außerdem soll damit eine Neuaufteilung/Steuerung der verfügbaren Ressourcen zur Laufzeit möglich sein und anhand dieser Aufteilung den Status neu auszuwerten.

Das mögliche Risiko soll rechtzeitig erkannt und signalisiert werden, um entsprechende Handlungen vorzunehmen. Ausgangspunkt dieser Arbeit ist jedoch die Tatsache, dass eine optimale Ressourcenverteilung bereits vorgenommen wurde und ein optimierter Plan der Zuteilung von Ressourcen zu den Prozessen ebenfalls vorliegt. Dementsprechend beschäftigt sich diese Arbeit nicht mit einem Modell für die Lösung eines Optimierungsproblems im Fall einer Ressourcenneuverteilung, sondern das Modell soll eine Möglichkeit anbieten die Ressourcen bei Bedarf manuell zu verteilen. Die Überwachung aller Prozesse soll anhand dieser Handlungen zeigen, ob

die Risiken damit vermieden und die Prozesse weiter planmäßig abgearbeitet werden können, oder ob eventuell weitere Risiken entstehen würden.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen primär einen praxisorientierten Bezug am Beispiel einer Kommissionierung besitzen. Zunächst wird sich jedoch mit der Fragestellung befasst, aus welchen grundlegenden Komponenten ein allgemeiner Prozess besteht und wie eine Zielfunktion definiert werden kann, welche den Zusammenhang dieser Komponenten mathematisch beschreibt. Basierend auf dieser Grundlage wird ein Kommissioniervorgang als Prozess modelliert. Es werden hierfür zusätzlich benötigte, zeitliche Faktoren ermittelt und die allgemeine Zielfunktion an den Kommissionierprozess adaptiert. Um eine Echtzeit-Überwachung zu ermöglichen, werden Zustände für die Prozesse definiert, welche auf dem aktuellen Status des jeweiligen Auftrages basieren. Schließlich wird ein vollständiges Modell eines Kommissionierprozesses aufgestellt.

Als Nächstes wird sich mit der Problemstellungen eines Ressourcenmanagements der Prozesse befasst. Hierbei wird zunächst untersucht, wie die Auswirkungen der Handlungen im Fall einer benötigten Ressourcenanpassung ermittelt werden können. Basierend auf der Ermittlung aktuell benötigten Ressourcen, werden dann die Möglichkeiten kontrollierter Handlungen mittels der aufgestellten Rahmenbedingungen, angebotenen Hilfestellungen sowie konkreten Vorschlägen ausgearbeitet.

Im letzten Kapitel werden weitere Optimierungsmöglichkeiten des Modells, sowie der Ermittlung möglichst günstigeren Lösungen für die Handlungen im Fall kritischer Situationen, ausgearbeitet und vorgestellt.

## 2 Modellierung eines Prozesses

Die Erschaffung eines vollständigen mathematischen Modells erfordert zunächst eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem zu modellierenden Objekt. Es sollen die einzelnen Bestandteile des Objekts identifiziert, deren Zusammenhänge und Abhängigkeiten klargestellt und entsprechend repräsentiert werden. Wird das Ziel befolgt nicht nur das Objekt in Form eines Modells darzustellen, sondern auch die Ermittlung anwendungsspezifischer Werte, so kann dies durch das Aufstellen einer (oder mehrerer) entsprechenden Zielfunktion erreicht werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit zu modellierende Objekt ist ein Kommissionierprozess. Aufgrund dessen, dass es sich hierbei um einen Prozess handelt, welcher zu einer festgelegten Zeit im gewünschten Zustand mündet, ist es vorteilhaft sich zunächst mit der Modellierung eines allgemeinen Prozesses zu beschäftigen. Diese Abstraktion ermöglicht es, das Modell im späteren Verlauf an beliebige Prozesse zu adaptieren.

### 2.1 Grundlegende Komponenten

Im ersten Schritt der Modellierung sollen die für einen Prozess relevanten Variablen festgelegt werden. Wird ein Prozess allgemein betrachtet, so lässt sich feststellen, dass dieser aus aneinander folgenden Aktivitäten besteht. Die Ausführung einer bestimmten Anzahl von Aktivitäten resultiert in einer Änderung des Prozesszustandes. Entspricht der erreichte Zustand jedoch nicht dem gewünschten Endzustand, so können auch Zwischenzustände entstehen, welche nach einer bestimmten Anzahl von Aktivitäten erreicht werden. Diese Zwischenzustände werden als Arbeitsschritte definiert. Zusammengefasst lässt sich also bisher festhalten:

- $Q$  - die Anzahl aller Arbeitsschritte eines Prozesses
- $y_i$  - die Anzahl der Aktivitäten pro Arbeitsschritt mit  $1 \leq i \leq Q$

Um einen Prozess in den gewünschten Zustand zu bringen müssen also Aktivitäten ausgeführt werden. Dies erfordert eine weitere Komponente, nämlich die Ressourcen, welche die Ausführung der Aktivitäten erst ermöglichen. Dadurch, dass die Ressourcenkapazität meist begrenzt ist, sorgt diese Komponente für viele Optimierungsprobleme. Einem Prozess wird also eine bestimmte Anzahl an Ressourcen zugeteilt. Des Weiteren existiert in einem Prozess eine Kostenkomponente. Diese beschreibt



den nötigen Aufwand, welchen die Ressourcen für die Ausführung einer Aktivität aufbringen müssen. In Fall eines zeitkritischen Prozesses, welcher zu einer vorgegebenen Zeit den Endzustand erreichen soll, wird der Aufwand durch die jeweils benötigte Zeit repräsentiert. Ein Prozess beinhaltet also noch zwei weitere Komponenten:

- $n$  - dem Prozess zugeteilte Ressourcen
- $x_i$  - der benötigte (Zeit-)Aufwand für die Aktivität  $y_i$  mit  $1 \leq i \leq Q$

Es kann nun ein Modell gebildet werden, welches den Zusammenhang aller Komponente mathematisch darstellt. Ein Prozess ist also eine Summe aller Arbeitsschritte, die jeweils aus Aktivitäten bestehen mit einem entsprechenden Aufwand, verteilt auf die ihm zustehenden Ressourcen.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^Q y_i \cdot x_i \quad (2.1)$$

## 2.2 Aktueller Status und die Zielfunktion

Die Ermittlung des aktuellen Zustandes eines Prozesses ist eins der anwendungsspezifischen Ziele dieser Arbeit. Mit dem bisher entstandenen Modell eines Prozesses ist es bisher nur möglich Aussagen über den gesamten Prozess „offline“, also im Vorfeld, zu treffen. Eine „online“ Auswertung des Prozesses, also zur Laufzeit, erfordert eine zusätzliche Komponente, welche eine Auskunft über bereits abgeschlossene Aktivitäten erteilt. Dieser sogenannte Indikator des Fortschritts  $q_i$  erweitert das Modell aus 2.1 und kann abhängig vom konkreten Anwendungsgebiet unterschiedlich angegeben werden:

- *prozentual* - wie viel Prozent der Aktivitäten wurden bereits ausgeführt:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^Q ((1 - q_i) \cdot y_i) \cdot x_i \text{ mit } 0 \leq q_i \leq 1$$

- *numerisch* - wie viele Aktivitäten wurden bereits ausgeführt:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^Q (y_i - q_i) \cdot x_i \text{ mit } 0 \leq q_i \leq y_i$$

Ist also der aktuelle Status bekannt, so kann anhand der Auswertung des Modells der verbliebende Aufwand bis zum Erreichen des Endzustandes ermittelt werden. Aufgrund dessen, dass die aufgelisteten Komponenten meist numerisch angegeben werden, bietet sich auch hier eine numerische Angabe des Indikators  $q_i$  an. Schließlich lässt sich eine Zielfunktion  $t_s(q)$  definieren, wobei  $q$  als Vektor  $(q_1, \dots, q_Q)$

übergeben wird.  $q_i$  ist der aktuelle Status des Arbeitsschritts  $i$ . Diese Zielfunktion erfüllt das anwendungsspezifische Ziel der Ermittlung des noch aufzubringenden Aufwandes, basierend auf dem aktuellen Status.

$$t_s(q) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^Q (y_i - q_i) \cdot x_i \text{ mit } q = (q_1, \dots, q_Q) \quad (2.2)$$

### 3 Adaption des Modells an einen Kommissionierprozess

Die Entscheidung in dieser Arbeit die Kommissionierung in einem Lager als Prozess zu modellieren basiert den ähnlichen Komponenten, die den Ablauf einer Kommissionierung beschreiben, und Rahmenbedingungen, welche die Kommissionierung charakterisieren. Ein Kommissionierprozess besteht aus mehreren, im Vorfeld definierten Arbeitsschritten. Diese bestehen wiederum aus einmaligen, oder auftragsabhängigen Aktivitäten. Ein Lagerhaus verfügt über eine bestimmte Anzahl von Arbeitern, welche für bevorstehende Kommissionieraufträge eingesetzt werden. Die Arbeiter werden somit als Ressourcen betrachtet und benötigen entsprechend eine gewisse Zeit für die Ausführung der jeweiligen Aktivität. Der durchschnittliche Zeitaufwand ist meist bekannt, sodass ein Plan für die entsprechend optimale Ressourcenverteilung über mehrere Kommissionieraufträge im Voraus erstellt werden kann, um die rechtzeitige Fertigstellung deren zu gewährleisten.

Heutzutage sind alle Großlager mit einem digitalen Lagerverwaltungssystem ausgestattet. Sind also die bereits optimierten Ablaufpläne für die Durchführung der Kommissionieraufträge dort hinterlegt, so können Arbeiter mittels Interaktionen mit dem System den aktuellen Fortschritt melden. Diese Informationen werden für den entsprechenden Indikator in dem Modell benutzt. Wie zu Beginn erwähnt, besteht ein Kommissionierprozess aus Arbeitsschritten mit einmaligen Aktivitäten (z.B. „Auftrag aufnehmen“, „Transportmittel nehmen“, „Ware auf einen Konsolidierplatz bringen“) sowie Arbeitsschritten mit einer auftragsabhängigen Anzahl der Aktivitäten (z.B. konkrete Anzahl an Picks). Abbildung 3.1 veranschaulicht einen beispielhaften Arbeitsschritt. Der Arbeiter berichtet über seinen Fortschritt sowohl zu Beginn, als auch am Ende einer Aktivität.

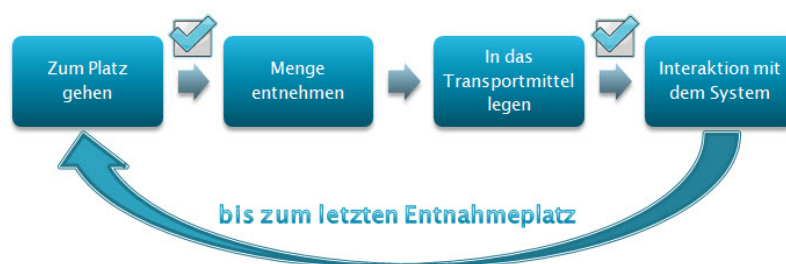


Abbildung 3.1: Arbeitsschritt eines Kommissionierprozesses

Zusammenfassend lassen sich also Komponente aus dem Modell 2.1 wie folgt auf den Kommissionierprozess übertragen:

- $Q$  - die Gesamtanzahl aller Arbeitsschritte eines Kommissionierauftrages
- $y_i$  - die Anzahl der Aktivitäten im jeweiligen Arbeitsschritt
- $q_i$  - die Anzahl bereits erledigten Aktivitäten des Arbeitsschrittes
- $n$  - für den jeweiligen Kommissionierauftrag zugeteilte Arbeiter
- $x_i$  - der durchschnittliche Zeitaufwand eines Arbeiters für die jeweilige Aktivität

Die Zielfunktion  $t_s$  (2.2) kann ebenfalls an einen Kommissionierprozess adaptiert werden und ermittelt somit die Zeit, die unter aktuellen Bedingungen bzw. basierend auf dem aktuellen Fortschritt bis zur Fertigstellung des Kommissionierauftrages noch benötigt wird.

Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung einer Echtzeit-Überwachung der Prozesse und eine rechtzeitige Erkennung möglicher Abweichungen von dem aufgestellten Plan. Die mathematische Modellierung eines Kommissionierprozesses und die Auswertung der Zielfunktion  $t_s$  bietet das nötige Fundament hierfür. Weiterhin müssen jedoch zusätzliche zeitliche Faktoren sowie Zustände definiert werden, welche ein Kommissionierprozess annehmen kann.

## 3.1 Zeitliche Faktoren

Die Überwachung zeitkritischer Prozesse dient in erster Linie dazu eine Auskunft darüber zu geben, ob der Zeitplan eingehalten wird, oder nicht. Hierfür müssen mindestens zwei folgende Werte gegeben sein: der aktuelle Zeitpunkt und der Zeitpunkt, zu welchem der Prozess seinen Endzustand erreichen soll. Im Fall eines Kommissionierprozesses lassen sich also weitere Faktoren definieren:

- $T_a$  - der aktuelle Zeitpunkt bzw. der Zeitpunkt, zu dem der Status ermittelt wird
- $T_e$  - der im Kommissionierauftrag festgelegte Zeitpunkt der Fertigstellung

Die Auswertung der Zielfunktion  $t_s$  ermöglicht die Ermittlung eines weiteren Zeitpunkts  $T_v$ , welcher den voraussichtlichen Zeitpunkt der Fertigstellung eines Kommissionierauftrages unter aktuellen Bedingungen angibt.

$$T_v = T_a + t_s(q) \quad (3.1)$$

Im Optimalfall sollte der Zeitpunkt  $T_v$  gleich dem vorgegebenen Zeitpunkt  $T_e$  sein. Wünschenswert wäre es einen gewissen Zeitpuffer zwischen  $T_e$  und  $T_v$  zu lassen, um die rechtzeitige Fertigstellung des Auftrages sicher zu gewährleisten.

## 3.2 Echtzeit-Überwachung mittels Zustandsermittlung

Basierend auf der Berechnung des voraussichtlichen Zeitpunktes der Fertigstellung  $T_v$  lässt sich die aktuelle Abweichung eines Kommissionierprozesses von dem vorgegebenen Zeitplan  $\varepsilon$  definieren.

$$\varepsilon = T_e - T_v \quad (3.2)$$

Mit der Ermittlung des aktuellen  $\varepsilon$  können nun alle Kommissionierprozesse mit einem der folgenden Zustände charakterisiert werden:

- $\varepsilon > 0$  - optimaler Zustand; der Auftrag wird unter aktuellen Bedingungen rechtzeitig abgeschlossen
- $\varepsilon = 0$  - unsicherer Zustand; der Auftrag wird unter aktuellen Bedingungen knapp zu dem vorgegebenen Zeitpunkt abgeschlossen
- $\varepsilon < 0$  - kritischer Zustand; der Auftrag wird unter aktuellen Bedingungen nicht rechtzeitig abgeschlossen

Wie bereits im Kapitel 3.1 erwähnt, ist eine bestimmte Untergrenze von  $\varepsilon$  (ein Zeitpuffer) für den jeweiligen Kommissionierauftrag erwünscht. Es wird also eine zusätzliche Komponente  $\varepsilon_i$  eingeführt, welche genau diesen wünschenswerten Zeitpuffer für den Kommissionierprozess  $i$  definiert. Mit dieser Komponente lassen sich die Aufträge unterschiedlich priorisieren. Sind für den Auftrag  $i$  keine weiteren Prozesse bis zur Abholung der Ware vorgesehen, so kann das  $\varepsilon_i$  entsprechend gering gewählt werden. Damit ändert sich ebenfalls die Sensibilität der Zustandsänderung der jeweiligen Kommissionierprozesse:

- Optimaler Zustand, falls  $\varepsilon > \varepsilon_i$
- Unsicherer Zustand, falls  $0 \leq \varepsilon < \varepsilon_i$
- Kritischer Zustand, falls  $\varepsilon < 0$

Die Echtzeit-Überwachung der Prozesse besteht somit aus der kontinuierlichen Zustandsermittlung der jeweiligen Prozesses. Die aktuellen Bedingungen sind die im Kapitel 3.1 definierten Zeitfaktoren, woraus sich das in diesem Kapitel eingeführte

$\varepsilon$  ergibt. Für die Berechnung von  $T_v$  wird die Zielfunktion  $t_s(q)$  anhand des aktuellen Fortschritts ausgewertet. Die Definition von  $t_s$  (2.2) beinhaltet eine Komponente, welche bei Bedarf angepasst werden kann, nämlich die dem Prozess zugeteilten Ressourcen  $n$ . Gerät ein Kommissionierprozess also aufgrund der entstandenen Verzögerung in einen kritischen Zustand, so kann dies mittels einer Anpassung der Ressourcenaufteilung behoben werden. Das Kapitel 4 befasst sich mit dieser Thematik.

### 3.3 Modell: Kommissionierprozess

Mit Hilfe der in diesem Kapitel vorgenommenen Adaption der Komponenten eines allgemeinen Prozesses an den Kommissionierprozess, lässt sich dieser nun durch folgenden Ausdruck beschreiben:

$$K_i = [Q_i, ((y_{i1}, x_{i1}) \dots (y_{iQ_i}, x_{iQ_i})), T_{ei}, n_i, \varepsilon_i] \quad (3.3)$$

Die Tupel  $(y_{i1}, x_{i1}) \dots (y_{iQ_i}, x_{iQ_i})$  beschreiben hier die jeweilige Anzahl der Aktivitäten eines Arbeitsschrittes und den dazugehörigen Zeitaufwand. Diese, sowie die Anzahl der Arbeitsschritte  $Q_i$  und der Zeitpunkt  $T_{ei}$ , sind fest definierte Komponente. Im Gegensatz dazu kann die Anzahl der zugeteilten Ressourcen  $n_i$  sowie ggf. der erwünschte Zeitpuffer  $\varepsilon_i$  zur Laufzeit angepasst werden.

## 4 Ressourcenmanagement

Die Zielsetzung der bisherigen Erarbeitung einer Echtzeit-Überwachung laufender Prozesse durch die entsprechende Modellierung und Zustandsermittlung war es kritische Situationen rechtzeitig zu erkennen und darüber entsprechend zu informieren. Der zweite Teil des für diese Arbeit gesetzten Ziels behandelt die Möglichkeit einer unmittelbaren Handlung in kritischen Situationen. Im Kapitel 3.2 wurde bereits festgestellt, dass durch die Anpassung der dem Prozess zugeteilten Ressourcen eine Zustandsänderung bewirkt werden kann.

Die Ausgangssituation dieser Arbeit setzt eine bereits zuvor optimierte Ressourcenaufteilung voraus, welche den Prozessen genügend Ressourcen zuweist, um den Zeitplan einzuhalten. Da hier jedoch mit Durchschnittswerten gerechnet wird und die Ressourcen menschlicher Natur sind, können nicht alle möglichen Störfaktoren, welche in einer zeitlichen Verzögerung resultieren, berücksichtigt werden. So kann allgemein festgehalten werden, dass bei Prozessen im kritischen Zustand ein Ressourcenmangel vorliegt, welcher aufgrund einer unvorhersehbaren Verzögerung entstanden ist und schnellstmöglich wieder ausgeglichen werden soll. Doch gerade weil eine optimierte Ressourcenaufteilung bereits vorgenommen wurde und die Ressourcenkapazität begrenzt ist, sollen die Handlungen in kritischen Situationen eine möglichst geringe globale Auswirkung haben und dennoch die Besserung der aktuellen Situation verursachen.

In der Praxis spielt der Erfahrungsaspekt meist eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund werden die endgültigen Handlungen dem Nutzer überlassen. Das Modell sieht somit keine automatische Reorganisation der Ressourcen in Form einer erneuten Optimierung vor, soll jedoch konkrete Hilfestellungen, Rahmenbedingungen und ggf. Vorschläge für die Handlungen anbieten, um die Entstehung weiterer Dysbalancen zu vermeiden.

### 4.1 Aktuell benötigte Ressourcen

Der Zustand eines Prozess kann also mittels der entsprechenden Anpassung der ihm zugeteilten Ressourcen geändert werden. Befindet sich ein Prozess in einem kritischen Zustand, so benötigt dieser mehr Ressourcen. In der Regel sind jedoch alle verfügbaren Ressourcen bereits auf alle parallel laufenden Prozesse aufgeteilt.

Für die Zuweisung weiterer Ressourcen einem Prozess im kritischen Zustand muss also zunächst eine bestimmte Anzahl an Ressourcen zur Verfügung gestellt werden. Dies kann nur durch die Reduzierung der Ressourcen anderer Prozesse realisiert werden. Es lassen sich somit zwei folgende Fragestellungen definieren:

- Welche Anzahl an Ressourcen eines Prozesses kann zum Zeitpunkt der Auswertung freigegeben werden, ohne diesen Prozess in einen kritischen Zustand zu versetzen?
- Welche Anzahl an Ressourcen wird benötigt, um den Ausgleich des Ressourcenmangels eines Prozesses im kritischen Zustand zu gewährleisten?

Es muss also eine Berechnung durchgeführt werden, welche eine Auskunft darüber gibt, welche Mindestmenge an Ressourcen  $bn$  aktuell benötigt wird, damit die jeweiligen Prozesse rechtzeitig abgeschlossen werden können. Der Vergleich der Ergebnisse dieser Berechnung mit den aktuellen Werten für  $n$  liefert die gesuchten Antworten zu den oben benannten Fragestellungen.

Der Status eines Kommissionierprozesses hängt von der zeitlichen Abweichung  $\varepsilon$  ab, welche die Differenz zwischen dem im Auftrag vorgegebenen Zeitpunkt  $T_e$  und dem voraussichtlichen Zeitpunkt der Fertigstellung  $T_v$  definiert (siehe Kapitel 3.2). Die Anzahl an Ressourcen  $n$  ist für die Auswertung der Zielfunktion  $t_s$  (2.2) entscheidend, welche die noch benötigte Zeit bis zur Fertigstellung des Auftrages liefert und woraus sich der voraussichtliche Zeitfaktor  $T_v$  errechnen lässt. Für die Berechnung der Mindestmenge  $bn$  soll also die Abweichung  $\varepsilon = 0$  werden. Dies bedeutet, dass hier eine ausreichende Anzahl an Ressourcen gesucht wird, um den voraussichtlichen Zeitpunkt der Fertigstellung  $T_v = T_e$  zu erreichen.

Der Zeitfaktor  $T_v$  errechnet sich aus der Summe des aktuellen Zeitfaktors  $T_a$  und der noch benötigten Zeit, welche mittels der aktuellen Auswertung der Zielfunktion  $t_s$  geliefert wird (siehe Kapitel 3.1). Um den voraussichtlichen Zeitpunkt der Fertigstellung  $T_v = T_e$  zu erreichen, soll also noch genau so viel Zeit bis zur Fertigstellung benötigt sein, wie die verbliebene Zeit zwischen dem Aktuellen Zeitpunkt  $T_a$  und dem festgelegten Zeitfaktor  $T_e$ . Die Funktion  $t_s$  lässt sich also umschreiben in

$$T_e - T_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^Q (y_i - q_i) \cdot x_i \quad (4.1)$$

Die gesuchte Mindestmenge  $bn$  ist somit die Anzahl der Ressourcen  $n$ , die unter aktuellen Bedingungen die Gleichung 4.1 erfüllt.



$$bn = \frac{\sum_{i=1}^Q (y_i - q_i) \cdot x_i}{T_e - T_a} \quad (4.2)$$

Mit der Formel 4.2 lässt sich also die Menge an Ressourcen bestimmen, welche unter aktuellen Bedingungen mindestens benötigt wird, damit der Auftrag genau rechtzeitig zu dem vorgegebenen Zeitpunkt  $T_e$  abgeschlossen werden kann. Aufgrund des fehlenden Zeitpuffers ist dies jedoch ein unsicherer Zustand. Im Kapitel 3.2 wurde eine zusätzliche Komponente  $\varepsilon_i$  eingeführt, welche für eine gewisse Absicherung durch den darin definierten Zeitpuffer gewährleistet. Damit sich ein Prozess also in einem optimalen Zustand befindet, soll der erünschte Zeitpuffer  $\varepsilon_i$  bei der Berechnung von  $bn$  ebenfalls mitberücksichtigt werden.

$$bn = \frac{\sum_{i=1}^Q (y_i - q_i) \cdot x_i}{T_e - T_a - \varepsilon_i} \quad (4.3)$$

## 4.2 Bedingungen für die Ressourcenneuverteilung

Ist die Mindestmenge der aktuell benötigten Ressourcen  $bn$  mittels der Formel 4.2 bzw. 4.3 bestimmt, so kann diese nun mit der tatsächlichen Anzahl an zugewiesenen Ressourcen  $n$  verglichen werden. Offensichtlich gilt  $n_j < bn_j$  für einen Prozess  $K_j$  im kritischen Zustand. Befindet sich ein Prozess  $K_i$  aktuell im optimalen Zustand, so gilt  $n_i \geq bn_i$ . Wie bereits im Kapitel 4.1 festgestellt, kann ein Ressourcenmangel eines Prozesses nur durch die Freigabe einer entsprechenden Menge an Ressourcen anderer Prozesse ausgeglichen werden. Die Anpassung der Ressourcen soll jedoch Entstehung weiterer Dysbalancen ausschließen. Die Ermittlung des jeweiligen  $bn$  erlaubt es nun konkrete Bedingungen für die Neuverteilung der Ressourcen aufzustellen, welche berücksichtigt werden sollen.

I. Bedingung für die Freigabe der Ressourcen eines Prozesses  $K_i$ :

$$n_i - k_i \geq bn_i \quad (4.4)$$

Die erste Bedingung ist durch die in 4.4 definierte Relation dargestellt. Somit kann eine Obergrenze für die Freigabe der Ressourcen  $k_i$  ermittelt werden, welche den optimalen Zustand des Prozesses  $K_i$  weiterhin gewährleistet.

II. Bedingung für den Ausgleich des Ressourcenmangels eines Prozesses  $K_j$ :

$$n_j + \sum_{i=1}^{K_m \setminus j} k_i = bn_j \quad (4.5)$$

Die zweite Bedingung ist in 4.5 definiert und muss erfüllt werden, um den Ressourcenmangel des Prozesses  $K_j$  auszugleichen. Die Summe der freigegebenen Ressourcen aller Prozesse, welche sich aktuell im optimalen Zustand befinden, soll, addiert zu der Menge  $n_j$ , genau die Mindestmenge  $bn_j$  betragen.

Die aufgestellten Bedingungen definieren die ersten Rahmenbedingungen für die manuelle Handlungen im Fall einer nötigen Ressourcenneuverteilung. Das Modell erteilt eine Auskunft über die konkrete Menge an Ressourcen, welche einem Prozess im kritischen Zustand fehlen, um die rechtzeitige Fertigstellung des Auftrages zu gewährleisten. Außerdem werden weitere Prozesse analysiert und die jeweilige Anzahl der zum Freigeben verfügbaren Ressourcen ebenfalls konkret ermittelt.

### 4.3 Ressourcenklassifizierung

Mit den im Kapitel 4.2 aufgestellten Rahmenbedingungen können bereits erste konkrete Hilfestellungen seitens des Modells erteilt werden. Die Anpassung der Ressourcenverteilung soll unter Berücksichtigung dieser Bedingungen durchgeführt werden, um den Zustand kritischer Prozesse zu verbessern und zugleich keine weiteren Prozesse zu gefährden.

Werden die Prozesse allgemein betrachtet, so sind alle Ressourcen zunächst gleichartig definiert. Somit werden auch die entsprechenden Handlungen im Fall einer nötigen Anpassung der Ressourcenverteilung unabhängig von der Ressourcenart durchgeführt. Konkrete Anwendungsfälle erfordern jedoch durchaus eine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Ressourcenarten, welche beispielsweise nur für bestimmte Aktivitäten zuständig sind. Für die praxisorientierte Modellierung ist es somit vorteilhaft eine Ressourcenklassifizierung einzuführen, um die Prozessinformationen zu erweitern und die angebotenen Hilfestellungen jeweils entsprechend dem aktuellen Fortschritt zu konkretisieren.

Wie bereits im Kapitel 3 dargestellt, besteht ein Kommissionierprozess aus einer Anzahl auftragabhängigen Aktivitäten. Die jeweiligen Aktivitäten ergeben zusammen Abreitsschritte, welche möglichst optimal erledigt werden müssen, um die rechtzeitige Fertigstellung des Auftrages zu gewährleisten. Die Ressourcen bzw. in diesem Fall die Arbeiter haben verschiedene Arten der Transportmittel zur Verfügung, welche

benötigt werden, um die jeweiligen Aktivitäten auszuführen. Das eingesetzte Transportmittel ist u. a. von der Waren- und Lagerart abhängig. Diese Feststellung führt zu einer Erweiterung der charakteristischen Beschreibung eines Arbeitsschrittes um einen weiteren Faktor, welcher die für die Ausführung der jeweiligen Aktivitäten benötigte Ressourcenklasse angibt. Dieses Attribut kann in einer beliebigen Art, welche die jeweilige Ressourcenklasse beschreibt, angegeben werden. Die Definition eines Kommissionierprozesses aus 3.3 kann nun vervollständigt werden.

$$K_i = [Q_i, ((y_{i1}, x_{i1}, kn_{i1}) \dots (y_{iQ_i}, x_{iQ_i}, kn_{iQ_i})), T_{ei}, n_i, \varepsilon_i] \quad (4.6)$$

Die charakteristische Beschreibung des jeweiligen Arbeitsschrittes ist nun ein Tripel, welcher aus der Anzahl der Aktivitäten  $y$ , dem dazugehörigen Zeitaufwand  $x$  und der neu eingeführten Ressourcenklassifizierung  $kn$  besteht. Dies ermöglicht nun nicht nur lediglich die fehlende Anzahl der Ressourcen eines Prozesses im kritischen Zustand zu errechnen, sondern auch die konkrete Ressourcenklasse zu ermitteln, welche zur Fertigstellung des aktuellen Arbeitsschrittes notwendig ist.

Mittels dieser Angabe wird eine weitere Hilfestellung seitens des Modells realisiert. Der aktuelle Status des jeweiligen Prozesses  $q = (q_1, \dots, q_Q)$ , welcher zur Auswertung der Zielfunktion  $t_s(q)$  (2.2) benötigt wird, bietet eine Auskunft darüber, wie viele Aktivitäten des jeweiligen Arbeitsschrittes bereits erledigt sind. Gleichzeitig kann anhand dieser Informationen ebenfalls ermittelt werden, welcher Arbeitsschritt aktuell bearbeitet wird und somit welche Ressourcenklassen dafür eingesetzt werden. Ist  $q_i = 0$ , so wurden noch keine Aktivitäten des Arbeitsschrittes  $i$  erledigt. Es werden also möglicherweise Ressourcen verschiedener Klassen benötigt, um den Auftrag fertigzustellen. Befindet sich ein solcher Prozess aktuell in einem kritischen Zustand, so soll die die Bedingung für den Ausgleich des Ressourcenmangels 4.5 zunächst nur mittels der Ressourcen einer Ressourcenklasse erfüllt werden, welche für die Beschleunigung des aktuellen Arbeitsschrittes benötigt werden. Die Planung der Ressourcen für die ausstehenden Arbeitsschritte wird weiterhin beibehalten. Alternativ kann der Anteil der jeweilig benötigten Ressourcenklassen für die ausstehenden Arbeitsschritte ebenfalls abhängig von dem aktuellen Fortschritt bestimmt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit ist der Fokus jedoch auf den Erfahrungsaspekt des Nutzers gelegt, welcher die endgültigen Handlungen tätigt. Das Modell unterstützt den Nutzer mit möglichst konkreten Informationen über den aktuellen Zustand sowie aktuellen Fortschritt und stellt Rahmenbedingungen auf, welche ebenfalls als Hilfestellungen agieren. Dementsprechend werden hier Informationen über den Fortschritt des aktuell ausgeführten Prozessarbeitsschrittes sowie noch ausstehende Arbeitsschritte und die jeweils benötigte Ressourcenklassen zur Verfügung gestellt, Rahmenbedingungen 4.4 und 4.5 definiert und dem Nutzer freie Handlungsmöglichkeit

sowie die Ermittlung deren Auswirkung durch die weiterhin bestehende Echtzeit-Überwachung geboten.

### 4.4 Konkrete Vorschläge

Auch wenn das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte Modell lediglich den Nutzer im Fall einer bestehenden Handlungsnotwendigkeit möglichst optimal und hilfreich unterstützen soll, so wäre mindestens ein konkreter Lösungsvorschlag seitens des Modells wünschenswert. Dieser agiert als Anhaltspunkt für die endgültige Entscheidung, welche weiterhin dem Nutzer überlassen bleibt.

Die Ermittlung eines konkreten Lösungsvorschlages verfolgt das Ziel der Maximierung des kleinsten  $\varepsilon$ . Hierfür wird die jeweilige Menge an freizugebenden Ressourcen aller Prozesse im optimalen Zustand bestimmt. Um die globalen Auswirkungen möglichst gering zu halten, werden Prozesse mit dem größten  $\varepsilon$  bevorzugt. Die gesamte Ressourcenmenge soll dem kritischen Prozess zugewiesen werden und somit das  $\varepsilon$  wieder anheben. Die Ermittlung basiert vollständig auf den bisher aufgestellten Funktionen und Rahmenbedingungen. Somit ist die nötige Dynamik eines Echtzeit-Modells auch hier weiterhin gewährleistet.

Das Algorithmusbeispiel in der Abbildung 4.1 dient als Pseudocodebeispiel, um den Ablauf der Ermittlung eines Lösungsvorschlages zu veranschaulichen.

Zu Beginn wird eine Menge  $K$  aller Prozesse im optimalen Zustand benötigt. Die Prozesse sollen in dieser Menge nach dem größten aktuellen  $\varepsilon$  absteigend sortiert sein. Ein Prozess  $K_i$  mit dem größten aktuellen  $\varepsilon$  befindet sich also an der ersten Stelle. Außerdem wird die zuvor errechnete Ressourcenmenge  $bn_j$  (4.2 bzw. 4.3) des kritischen Prozesses  $K_j$  übergeben, welche zum Abschluss der Berechnung erreicht werden soll.

Der ermittelte Lösungsvorschlag  $R$  ist eine Reihe an Werten, welche die Anzahl der jeweilig freizugebenden Ressourcen der Prozesse in  $K$  in der entsprechenden Reihenfolge angeben.

Wie bereits erwähnt werden aktuelle Rahmenbedingungen des Modells für die Berechnung der jeweiligen Werte eines Lösungsvorschlages benutzt. Es wird mit dem Prozess mit dem größten aktuellen  $\varepsilon$  begonnen, was durch die gegebene Reihenfolge der Prozesse in der Menge  $K$  gewährleistet ist. Mittels der Bedingung in 4.4 wird die Menge der zur Verfügung stehenden Ressourcen  $k_i$  bestimmt und diese zunächst vollständig gespeichert. Reicht diese Menge zum Ausgleich des Ressourcenmangels aus, was mittels der in 4.5 aufgestellten Funktion ermittelt werden kann, so wird überprüft, ob die benötigte Ressourcenmenge möglicherweise sogar überschritten wurde.

In diesem Fall wird der Wert des zuletzt aufgerufenen Prozesses entsprechend angepasst, um die Gefahr eines neuen Ressourcenmangels zu vermeiden. Wurde die gesamte Ressourcenmenge  $bn_j$  erreicht bevor alle Prozesse in  $K$  untersucht wurden, so sind keine weiteren Berechnungen nötig und die dazugehörigen Werte der restlichen Prozesse in  $R$  werden gleich Null gesetzt.

```

Input :  $K = [K_1, \dots, K_m]$  nach dem größten  $\varepsilon$  absteigend sortiert
/* Alle Prozesse im optimalen Zustand, entsprechend sortiert */
     $bn_j$  bestimmt mittels 4.2 bzw. 4.3
/* Benötigte Ressourcenmenge für den kritischen Prozess  $K_j$  */

Output :  $R = [k_1, \dots, k_m]$  mit  $k_i \in \mathcal{N}_0$ 
/* Konkreter Lösungsvorschlag mit jeweils  $k_i$  der Anzahl an
    freizugebenden Ressourcen des Prozesses  $K(i)$  */

 $x = 0;$ 
 $k_j = 0;$ 
for  $i = 1$  to  $n = |K|$  do
    bestimme  $bn$  von  $K(i)$  mittels 4.2 bzw. 4.3;
    /* Aktuell benötigte Ressourcenmenge */
    bestimme  $k_i$  (Bedingung in 4.4);
    /* Menge der freizugebenden Ressourcen */
     $k_j += k_i;$ 
     $R(i) = k_i;$ 
    if  $k_j \geq bn_j$  then
        /* Ist die Bedingung in 4.5 erfüllt? */
        if  $k_j > bn_j$  then
            /* Falls die Ressourcenmenge zu hoch ist */
             $x = k_j - bn_j;$ 
             $k_i -= x;$ 
             $R(i) = k_i;$ 
        end
        if  $i \neq |K|$  then
            /* Falls weitere Prozesse ausstehen, jedoch  $bn_j$  bereits
                erreicht wurde */
            for  $j = i + 1$  to  $|K|$  do
                 $R(j) = 0;$ 
            end
        end
        break;
    end
end

```

Abbildung 4.1: Algorithmus zur Ermittlung eines Lösungsvorschlags

Der ermittelte Lösungsvorschlag bietet mit einer großen Wahrscheinlichkeit nicht die optimale Lösung an, berücksichtigt jedoch die aktuellen Rahmenbedingungen, um keinen Ressourcenmangel weiterer Prozesse zu verursachen. Aufgrund der Echtzeit-Fähigkeit des Modells, kann die Lösung dynamisch angepasst werden. Die Auswirkungen auf den jeweiligen Prozess zum aktuellen Zeitpunkt werden umgehend ermittelt und entsprechend dargestellt.

## 5 **Ausblick auf weitere Optimierungen**

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Modell (3.3), sowie die aufgestellten Zielfunktionen (2.2, 4.2 bzw. 4.3), mögliche Zustände (Kapitel 3.2) und entsprechend generierte Rahmenbedingungen (4.4 und 4.5), erfüllen bereits das Ziel einer Echtzeit-Überwachung der Prozesse und die Steuerung bzw. Anpassung der Ressourcen im Fall einer kritischen Situation mit einer umgehenden Auswertung deren Auswirkungen auf die jeweiligen Prozesse. Außerdem werden konkrete Hilfestellungen für die Handlungen geboten, um die Versetzung weiterer Prozesse in einen kritischen Zustand zu vermeiden (Kapitel 4). Aufgrund einer praxisbezogenen Modellierung am Beispiel eines Kommissionierprozesses, und des in der Praxis entscheidenden Erfahrungsaspekts, bleibt die endgültige Entscheidung über die konkreten Handlungen weiterhin dem Nutzer überlassen.

Wie bereits zu Beginn klargestellt, wird das Ziel einer Optimierung der Ressourcenverteilung im kritischen Fall nicht verfolgt. Die Ausgangssituation erfordert einen im Voraus erstellten, optimierten Plan der Ressourcenverteilung sowie ebenfalls einen entsprechend aufgestellten Zeitplan. Das Modell soll möglichst konkrete Hilfestellungen und Hinweise bieten, falls im Laufe der Durchführung ein Bedarf der Ressourcenanpassung entsteht. Neben den bereits in dieser Arbeit erarbeiteten Fähigkeiten des Modells, sind einige weitere Optionen zur Optimierung möglich.

### 5.1 **Globaler Status**

Die bisherige Ermittlung konkreter Lösungsvorschläge für eine Anpassung der Ressourcen, um den Ressourcenmangel eines kritischen Prozesses auszugleichen, basiert auf der Statuserhaltung aller anderen Prozesse. Hierbei werden die Prozesse im optimalen Zustand jeweils einzeln untersucht und diejenigen mit dem aktuell größten  $\varepsilon$  bevorzugt (siehe Kapitel 4.4). Dabei wird jedoch nicht untersucht, ob beispielsweise eine gleichmäßig verteilte Ressourcenfreigabe eine deutlich günstigere Auswirkung im Bezug auf alle Prozesse haben könnte. Mittels der Einführung eines globalen Status  $\varepsilon_g$  entsteht die Möglichkeit auch diesen Aspekt zu berücksichtigen.

$$\varepsilon_g = \frac{1}{K_m - 1} \sum_{i=1}^{K_m \setminus j} \varepsilon_{K_i}$$

Eine simple Realisierung der Ermittlung eines globalen Status  $\varepsilon_g$  bietet eine Mittelwertbildung über alle  $\varepsilon$  der Prozesse. Hierfür sind jedoch nur die Prozesse im optimalen Zustand relevant, da nur diese einer Ressourcenfreigabe zum Ausgleich des Ressourcenmangels von  $K_j$  unterzogen werden können. Abhängig von der Anzahl an freigegebenen Ressourcen, ändert sich auch das jeweilige  $\varepsilon_K$  der Prozesse. Somit lässt sich eine Funktion  $\varepsilon_g(k)$  definieren, wobei  $k = (k_1, \dots, k_m)$  die konkrete Lösung der Ressourcenanpassung ist mit  $k_i$  der Anzahl an freizugebenden Ressourcen des Prozesses  $K_i$ .

$$\varepsilon_g(k) = \frac{1}{K_m - 1} \sum_{i=1}^{K_m \setminus j} \varepsilon_{K_i}(k_i) \quad (5.1)$$

Der Einfluss des jeweiligen  $k_i$  der gewählten Lösung  $k$  auf das jeweilige  $\varepsilon_{K_i}$  wird mittels der Berechnung von  $\varepsilon$  ersichtlich:

Aus 3.2 und 3.1 folgt

$$\varepsilon_{K_i} = T_{e_i} - T_{v_i} = T_{e_i} - T_a + t_{s_i}$$

Aus 2.2 folgt

$$\varepsilon_{K_i} = T_{e_i} - T_a + \frac{\sum_{i=1}^Q (y_i - q_i) \cdot x_i}{n - \mathbf{k}_i} \quad (5.2)$$

Die Abhängigkeit der Änderung des Wertes der Zielfunktion  $t_{s_i}$  (und somit des  $\varepsilon_{K_i}$ ) von  $k_i$  ist in 5.2 zu sehen.

Die Anpassung der Ressourcen soll einen möglichst geringen bzw. günstigen Einfluss auf den globalen Status haben. Das  $\varepsilon_g$  soll idealerweise möglichst hoch gehalten werden. Somit ist eine Lösung  $k$  gesucht, welche die Zielfunktion  $\varepsilon_g(k)$  maximiert und zugleich die notwendigen Bedingungen (4.4 und 4.5) erfüllt. Die Suche nach einem Verfahren, welches die optimale Lösung liefert, ergab einige Optionen. Im Bereich des Operations Research bzw. der linearen Optimierung existiert zur Lösung solcher Problemstellungen das Simplex-Verfahren [1]. Mittels dieses Verfahrens wird eine



Kostenfunktion, welche in Form einer linearen Zielfunktion angegeben ist, maximiert bzw. minimiert. Die aufgestellten Nebenbedingungen werden um sogenannte Schlupfvariablen erweitert und der zulässige Lösungsraum bestimmt. Schließlich wird eine optimale Lösung iterativ ermittelt. Die Anwendung dieses Verfahrens auf die Zielfunktion  $\varepsilon_g$  gestaltet sich jedoch problematisch aufgrund ihrer vom Standard abweichenden Form.

Ein weiteres Verfahren, namens Lagrange-Verfahren [3], wird in der Mathematik zur Extremwertberechnung einer Funktion mit Nebenbedingungen benutzt. Die Nebenbedingungen werden hier ebenfalls als Funktionen ausgedrückt und eine neue skalare Variable für jede Nebenbedingung, der Lagrange-Multiplikator, eingeführt. Schließlich wird nach einer Lösung gesucht, welche sowohl die Funktion der Nebenbedingungen erfüllt, als auch den Gradienten dieser senkrecht zu dem der Zielfunktion setzt. Somit wird ein gemeinsamer Punkt des Verlaufes beider Funktionen gefunden, in welchem diese tangential zueinander verlaufen. Die Lagrange-Funktion beschreibt genau dieses Verhältnis der Zielfunktion und der Funktion der Nebenbedingungen und das Verfahren basiert auf der Extremwertsuche der genannten Lagrange-Funktion. Dieses Verfahren ist aufgrund der beliebigen Form der Zielfunktion zur Maximierung von  $\varepsilon_g(k)$  besser geeignet, allerdings entsteht eine weitere Problematik in der Darstellung der Nebenbedingungen in Form einer Funktion, welche einen bestimmten Wert annehmen soll. Die Bedingung 4.4 ist durch eine Relation  $A - k \geq B$  beschrieben. Die Umformung dieser zu einer Form  $A - k = B$  würde zu der Freigabe der maximal möglichen Anzahl an Ressourcen führen und somit die Optimierungsmöglichkeiten der gleichmäßigen Verteilung eliminieren.

## 5.2 $m : n$ Klassenbeziehung für Ressourcen

Die im Kapitel 4.3 beschriebene Möglichkeit einer Unterteilung der Ressourcen in verschiedene Klassen, welche jeweils für bestimmte Aktivitäten benötigt sind, beschränkt sich zunächst auf eine  $1 : n$  Klassenbeziehung. Dementsprechend können Ressourcen nur zu einer bestimmten Klasse gehören. Ausgehend von dem praxisbezogenen Beispiel einer Kommissionierung handelt es sich bei Ressourcen meist um die Mitarbeiter, welche mit Hilfe auftrags- und aktivitätsabhängigen Transportmittel die jeweiligen Arbeitsschritte ausführen. Einige Mitarbeiter können jedoch durchaus einen sicheren Umgang nicht nur ausschließlich mit einem einzigen, sondern mit mehreren Transportmittel aufweisen. Somit besteht eine Möglichkeit diese universell und nicht beschränkt auf eine Aktivität einzusetzen. Die Definition einer  $m : n$  Klassenbeziehung zwischen den Ressourcen und der jeweiligen Klassen bie-

tet mehr Flexibilität in der Ermittlung einer möglichst optimalen Lösung für den Ausgleich eines Ressourcenmangels kritischer Prozesse.

Das Modell war bisher in der Lage basierend auf dem aktuellen Status eines Prozesses mitzuteilen, Ressourcen welcher Ressourcenklassen zur Fertigstellung des aktuellen, sowie ggf. noch ausstehender Arbeitsschritte benötigt werden. Aufgrund der im Kapitel 4.3 definierten  $1 : n$  Klassenbeziehung zwischen den Ressourcen und der Ressourcenklassen bestand die vom Modell vorgeschlagene Handlung zum Ausgleich des Ressourcenmangels lediglich aus den zur Fertigstellung des aktuellen Arbeitsschrittes benötigten Ressourcen. Stehen jedoch noch weitere Arbeitsschritte bevor, welche Ressourcen weiterer Ressourcenklassen benötigen, so werden die hinzugekommene Ressourcen nicht mehr aushelfen können, falls diese tatsächlich eine  $1 : n$  Klassenbeziehung aufweisen. Dies kann dazu führen, dass die hierdurch erreichte Beschleunigung der Fertigstellung des aktuellen Arbeitsschrittes nicht ausreichend gewesen ist und der Prozess wieder in einen kritischen Zustand versetzt wird.

Ist jedoch eine  $m : n$  Klassenbeziehung gegeben, so können die Ressourcen möglicherweise zur Beschleunigung der Fertigstellung mehrerer Arbeitsschritte beitragen. Mittels der Information über den aktuellen Zustand eines kritischen Prozesses kann ermittelt werden, Ressourcen welcher Klassen zur endgültigen Fertigstellung des Prozesses noch benötigt werden. Sind die Ressourcenklassen bekannt, so können aktuelle Prozess im optimalen Zustand nach Ressourcen untersucht werden, welche idealerweise zu denselben Klassen gehören. Diese Voraussetzung stellt neben den bereits aufgestellten Bedingungen (4.4 und 4.5) ein weiteres Kriterium zur Ermittlung einer geeigneten Lösung dar. Können die aufgestellten Bedingungen nur mittels Ressourcen solcher Art nicht erfüllt werden, so wird eine weitere Analyse der Prozesse durchgeführt werden, welche das Kriterium der geeigneten Ressourcen reduziert. Somit kann die Lösung mit den Ressourcen ergänzt werden, welche zu  $x$  aus  $n$  benötigten Klassen gehören.

Das aufgestellte Kriterium und die Möglichkeit der schrittweisen Relaxation können in das Ermittlungsverfahren konkreter Lösungsvorschläge (siehe Kapitel 4.4) integriert werden. Aufgrund der gegebenen Flexibilität, und abhängig von der genauen Gestaltung des Algorithmus, kann das Ermittlungsverfahren mehrere geeigneten Lösungsvorschläge liefern. In einem weiteren Optimierungsschritt können diese nun auf eine Lösungsmenge der geeignetsten Vorschläge reduziert werden. Hierfür eignet sich das Verfahren der Pareto-Optimierung aufgrund der Abhängigkeit der Güte (in diesem Fall des globalen Status  $\varepsilon_g$ ) von mehreren Mengen der freigegebenen Ressourcen jeweiliger Prozesse. Es wird also nach den Lösungsvorschlägen gesucht, welche einen optimalen Kompromiss zwischen der Erfüllung des gestellten Kriteriums (die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Anzahl der benötigten Ressourcenklassen) und der

globalen Auswirkung  $\varepsilon_g$  darstellen. Die Informationen zu den jeweiligen Auswirkungen, sowie Vor- und Nachteilen der Lösungen werden dem Nutzer zur Verfügung gestellt, womit eine Erweiterung der Hilfestellung des Modells erreicht wird.

### 5.3 Ressourcenzusammenstellung für neue Prozesse

Die Anzahl der zur Ausgangssituation geplanten Prozesse kann sich im Verlauf der Bearbeitungszeit ändern. Es ist durchaus möglich, dass beispielsweise Prozesse mit einem geringeren Auftragsvolumen ungeplant beauftragt werden und die Bearbeitung dieser umgehend begonnen werden soll. Hierfür werden entsprechende Ressourcen benötigt. Diese sind jedoch meist bereits vollständig für die im Voraus geplanten Prozesse optimal aufgeteilt. Die in dem Modell vorgesehenen Hilfestellungen und verfahren können in einer solchen Situation ebenfalls zur Bereitstellung der für die Bearbeitung der neuen Prozesse benötigten Ressourcen beitragen.

Hierfür wird der neue Prozess als kritischer Prozess  $K_j$  betrachtet und zunächst die Anzahl der benötigten Ressourcen  $bn_j$  (4.3) ermittelt. Abhängig von dem Auftrag, besteht diese Anzahl aus Ressourcen einer, oder mehreren Ressourcenklassen. Im nächsten Schritt werden alle aktuellen Prozesse untersucht und die jeweilige Anzahl der zur Freigabe stehenden Ressourcen ermittelt (Bedingung 4.4). Die rechtzeitige Fertigstellung des neuen Prozess kann jedoch erst dann gewährleistet werden, wenn auch die Bedingung 4.5 erfüllt ist. Es müssen also aktuell genügend Ressourcen zur Freigabe bereitstehen. Benötigt der neue Prozess Ressourcen verschiedener Ressourcenklassen, so eignet sich hierfür die im Kapitel 5.2 beschriebene  $m : n$  Ressourcenklassifizierung und die entsprechende Optimierung der Ermittlung konkreter Lösungsvorschläge. Ist dies nicht der Fall und es besteht eine  $1 : n$  Klassenbeziehung, so sollen die freigegebenen Ressourcen zu der entsprechenden Klasse gehören sowie insgesamt der Menge  $bn_j$  entsprechen. Die Bestimmung der konkreten Mengen von Ressourcen der jeweiligen Ressourcenklassen ist von der Anzahl der Aktivitäten abhängig, für welche diese zuständig sind. Ausgehend von der Gesamtmenge benötigter Ressourcen  $bn_j$  kann nun die manuelle Zuweisung der zur Freigabe stehenden Ressourcen zu den jeweiligen Arbeitsschritten entsprechend der Klassifizierung durchgeführt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Domschke, W; Drexl, A: „Einführung in Operations Research.“, Springer-Verlag, 8. Auflage, *Lineare Optimierung* (S. 13-65), Berlin, Heidelberg 2011.  
5.1
- [2] Logemann, U.: „Methodik zur Planung und Steuerung der Kommissionierung in der logistischen Produktion des Versandhandels.“, Dissertation, Institut für Fördertechnik und Logistik, Stuttgart, 2007.
- [3] Opitz, O: „Mathematik: Lehrbuch für Ökonomen“, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 9. Auflage, *Optimierung mit Nebenbedingungen* (S. 517-530), München, 2004.  
5.1
- [4] Van Hentenryck, P; Bent R.: „Online Stochastic Combinatorial Optimization.“, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2006.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich, Oleksandr Tokunov, versichere hiermit, dass ich meine Masterarbeit mit dem Thema

*Modellierung einer online Überwachung und Steuerung von Ressourcen  
im Kommissionierprozess und hier kommt der Untertitel*

selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, wobei ich alle wörtlichen und sinngemäßen Zitate als solche gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

St. Augustin, den 23. August 2014

---

OLEKSANDR TOKUNOV