

OTTO-VON-GUERICKE-  
UNIVERSITÄT  
MAGDEBURG

Tobias Reggelin

## Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme

Michael Schenk (Hrsg.)



Institut für  
Logistik und Materialflusstechnik



# Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Wirtsch.-Ing. M.Sc. Tobias Reggelin  
geb. am 26.10.1977 in Magdeburg

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Michael Schenk  
Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter

Promotionskolloquium am 9. Mai 2011

## **Impressum**

Tobias Reggelin

Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Michael Schenk

Institut für Logistik und Materialflusstechnik

Fakultät für Maschinenbau

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Universitätsplatz 2

39106 Magdeburg

[www.ilm.ovgu.de](http://www.ilm.ovgu.de)

Verlag:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Universitätsplatz 2

39106 Magdeburg

[www.ovgu.de](http://www.ovgu.de)

Herstellung:

docupoint GmbH

Otto-von-Guericke-Allee 14

39179 Barleben

Umschlagentwurf und -gestaltung:

Arnhild Gerecke

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-940961-63-1

© Tobias Reggelin

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF Magdeburg.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c. mult. Michael Schenk, Leiter des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Leiter des Fraunhofer-Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF Magdeburg, für die Betreuung der Arbeit und die Unterstützung und Förderung meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter, Leiter des Forschungsbereichs Intelligente Produktions- und Logistiksysteme an der Universität Bremen, für die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken. Ebenfalls zu großem Dank bin ich Herrn PD Dr. rer. nat. habil. Juri Tolujew verpflichtet, der mir in vielen Gesprächen und Diskussionen wertvolle Anregungen zu dieser Arbeit gab.

Ebenso möchte ich mich bei allen Kollegen am ILM und Fraunhofer IFF für die vielen Diskussionen zu den Inhalten der Arbeit und die Unterstützung bei der Fertigstellung bedanken. Ein großer Dank gilt auch Herrn Martin Zeitfuchs und Herrn Stefan Weltge, die maßgeblich an der Programmierung der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Simulationssoftware beteiligt waren. Bedanken möchte ich mich außerdem bei meiner Familie und meinen Freunden, die immer an mich geglaubt und mich unterstützt haben.

Magdeburg, Juni 2010

*Tobias Reggelin*



# Kurzfassung

Simulationsmodelle sind ein wichtiges Hilfsmittel bei Planung, Realisierung und Betrieb logistischer Flusssysteme, da sie das dynamische Systemverhalten abbilden können. Die im Bereich der Logistik verbreiteten ereignisdiskreten Simulationsmodelle sind oft mit einem hohen Aufwand für Modellerstellung und -berechnung verbunden.

Die Arbeit entwickelt und beschreibt deshalb die Grundprinzipien eines neuen Modellierungs- und Simulationsansatzes, der eine schnelle Analyse des dynamischen Verhaltens logistischer Flusssysteme ermöglicht. Hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit logistischer Flussprozesse ordnet sich der entwickelte Ansatz zwischen objektbasierten ereignisdiskreten und flussbasierten kontinuierlichen Modellen ein und wird deshalb als mesoskopischer Modellierungs- und Simulationsansatz bezeichnet.

Die Grundidee des mesoskopischen Ansatzes besteht in der Abbildung logistischer Flussprozesse auf einer aggregierten Ebene, um eine schnelle Modellerstellung und -berechnung zu ermöglichen. Deshalb operieren mesoskopische Modelle mit Flussobjektmenngen und nicht mit einzelnen Flussobjekten. Logistikprozesse können somit durch Flüsse mit stückweise konstanten Flussintensitäten abgebildet werden. Das erlaubt die Anwendung der Mechanismen der Discrete Rate Simulation (Ereignisplanung für lineare kontinuierliche Flussprozesse) und führt zu einer schnellen Modellberechnung.

Um die Abbildungsgenauigkeit der flussbasierten Modellierung zu erhöhen, können mesoskopische Simulationsmodelle zusätzlich Produkttypen und Produktportionen innerhalb eines Flusses unterscheiden sowie impulsförmige Flüsse verwenden. Die mesoskopischen Modellelemente erlauben eine Abbildung beliebiger Strukturen und Prozesse logistischer Flusssysteme.

Im Rahmen der Arbeit wurde weiterhin ein mesoskopischer Simulator für eine direkte Implementierung mesoskopischer Modelle entwickelt. Das mesoskopische Modellierungs- und Simulationskonzept und der mesoskopische Simulator ergänzen den existierenden Methoden- und Werkzeugsatz der Simulation für die Untersuchung logistischer Flusssysteme.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>v</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung . . . . .	1
1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlagen . . . . .	5
2.1.1 Logistische Flusssysteme . . . . .	5
2.1.2 Modellierung und Simulation . . . . .	8
2.2 Simulationskonzepte . . . . .	20
2.2.1 Einleitung . . . . .	20
2.2.2 Ereignisdiskrete Simulation . . . . .	22
2.2.3 System-Dynamics-Modelle . . . . .	23
2.2.4 Kombinierte diskret-kontinuierliche Simulation . . . . .	26
2.2.5 Discrete-Rate-Simulation . . . . .	26
2.2.6 Fazit . . . . .	31
<b>3 Mesoskopischer Modellierungs- und Simulationsansatz</b>	<b>33</b>
3.1 Grundideen des mesoskopischen Ansatzes . . . . .	33
3.2 Anwendungsbereich des mesoskopischen Ansatzes . . . . .	43
<b>4 Grundprinzipien der mesoskopischen Modellierung und Simulation</b>	<b>49</b>
4.1 Klassifikation von Prozessen in Flusssystemen . . . . .	49
4.1.1 Flussprozessgrundtypen . . . . .	50
4.1.2 Kombinierte Flussprozesstypen . . . . .	53
4.2 Prozessmodelle existierender Simulationskonzepte . . . . .	55
4.2.1 Prozessmodell der ereignisdiskreten Simulation . . . . .	56
4.2.2 Prozessmodell der kontinuierlichen Simulation . . . . .	56
4.2.3 Prozessmodell der Discrete-Rate-Simulation . . . . .	59
4.3 Mesoskopisches Prozessmodell . . . . .	60

4.4	Mesoskopisches Produktmodell . . . . .	68
4.5	Mesoskopischer Simulationsmechanismus . . . . .	71
4.5.1	Ereignisse . . . . .	71
4.5.2	Simulationsalgorithmus . . . . .	74
4.6	Mesoskopische Modellelemente . . . . .	77
4.6.1	Modellelemente im Überblick . . . . .	77
4.6.2	Trichter (T) . . . . .	79
4.6.3	Montageelement (M) . . . . .	84
4.6.4	Demontageelement (D) . . . . .	89
4.6.5	Verzögerungselement (V) . . . . .	93
4.6.6	Quelle (Q) . . . . .	97
4.6.7	Senke (S) . . . . .	99
4.6.8	Zusammenfassung . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Anwendung der mesoskopischen Modellierung und Simulation</b>	<b>103</b>
5.1	Mesoskopischer Simulator . . . . .	103
5.2	Anwendungsbeispiele . . . . .	105
5.2.1	Ressourcenverteilung an einem Logistikhub . . . . .	105
5.2.2	Ableitung von Maßnahmen bei Störungen logistischer Prozesse . . .	108
5.3	Zusammenfassung . . . . .	112
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>117</b>

# Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

## Formelzeichen

$b^p$	ID einer Produktportion von Produkttyp $p$
$b_{out}^p(t_i)$	ID einer Outputproduktportion von Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$C$	kumulierte Flussmenge
$C_{in}(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge an einem Modellelement über alle Produkttypen im Zeitraum $[t_i, t_j]$
$C_{in}^p(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge an einem Modellelement für Produkttyp $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
$C_{in}^{p,vg}(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge an einem Modellelement für Produkttyp $p$ vom Vorgänger $vg$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
$C_{out}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge an einem Modellelement über alle Produkttypen im Zeitraum $[t_i, t_j]$
$C_{out}^p(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge an einem Modellelement für Produkttyp $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
$C_{out}^{p,nf}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge an einem Modellelement für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
$\Delta t$	Simulationszeitschritt
$\Delta t_{fix}$	konstanter Simulationszeitschritt
$\Delta t_{var}$	variabler Simulationszeitschritt
$d^p(t_i)$	Demontageverhältnis für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$ , d. h. wie viel Output für Produkttyp $p$ aus einer Inputeinheit entsteht
$e$	Modellelementnummer

$\lambda$	Flussrate
$\lambda_{in}(t_i)$	Intensität des Inputflusses an einem Modellelement über alle Produkttypen $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$\lambda_{in}^p(t_i)$	Intensität des Inputflusses an einem Modellelement für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$\lambda_{in}^{p,vg}(t_i)$	Intensität des Inputflusses an einem Modellelement für Produkttyp $p$ vom Vorgänger $vg$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$\lambda_{out}(t_i)$	Intensität des Outputflusses an einem Modellelement über alle Produkttypen für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$\lambda_{out}^p(t_i)$	Intensität des Outputflusses an einem Modellelement für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$\lambda_{out}^{p,nf}(t_i)$	Intensität des Outputflusses an einem Modellelement für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$\lambda_{out}^{p,vg}(t_i)$	Intensität des Outputflusses des Vorgängers $vg$ eines Modellelements für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$M$	Menge eines zeitlosen Impulses
$M_{in}(t_i)$	Menge eines Inputimpulses an einem Modellelement über alle Produkttypen $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
$M_{in}^p(t_i)$	Menge eines Inputimpulses an einem Modellelement für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
$M_{in}^{p,vg}(t_i)$	Menge eines Inputimpulses an einem Modellelement für Produkttyp $p$ vom Vorgänger $vg$ zum Zeitpunkt $t_i$
$M_{out}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses an einem Modellelement über alle Produkttypen $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
$M_{out}^p(t_i)$	Menge eines Outputimpulses an einem Modellelement für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
$M_{out}^{p,nf}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses an einem Modellelement für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ zum Zeitpunkt $t_i$
$M_{out}^{p,vg}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses des Vorgängers $vg$ eines Modellelements für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
$m^p(t_i)$	Montageverhältnis für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$ , d. h. wie viel Inputmenge von Produkttyp $p$ für eine Outputeinheit benötigt wird

---

$\mu$	Grenzleistung
$\mu_i(t)$	Grenzleistung an einem Modellelement für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$\mu^p(t_i)$	Grenzleistung an einem Modellelement für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$NF$	Menge aller Nachfolger eines Modellelements
$P$	Menge aller Produkttypen
$p$	ID eines Produkttyps
$p_{out}(t_i)$	ID Outputprodukttyp für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$S$	Bestand
$S(t_i)$	Bestand an einem Modellelement über alle Produkttypen $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
$S^p(t_i)$	Bestand an einem Modellelement für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
$SV(t_i)$	Steuerungsvariable zum Zeitpunkt $t_i$
$t_i$	Simulationszeitpunkt
$t_i^{fix}$	Zeitpunkt bei konstantem Simulationszeitschritt
$t_i^{var}$	Zeitpunkt bei variablem Simulationszeitschritt
$\tau^p(t_i)$	Verzögerungszeit für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$v^{p,nf}(t_i)$	Verteilung des Outputflusses bzw. -impulses an einem Modellelement für Produkttyp $p$ an das nachfolgende Modellelement $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
$VG$	Menge aller Vorgänger eines Modellelements
$z^p$	Zustand des Verzögerungselements (an/aus)
<b>Indizes</b>	
$b$	Produktportion
$D$	Demontageelement

<i>in</i>	Inputgröße in ein Modellelement
<i>M</i>	Montageelement
<i>nf</i>	nachfolgendes Modellelement
<i>out</i>	Outputgröße aus einem Modellelement
<i>p</i>	Produkttyp
<i>Q</i>	Quelle
<i>S</i>	Senke
<i>T</i>	Trichterelement
<i>V</i>	Verzögerungselement
<i>vg</i>	vorhergehendes Modellelement

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Simulationsmodelle sind ein wichtiges Hilfsmittel bei Planung, Realisierung und Betrieb von Produktions- und Logistiksystemen, da mit ihnen das dynamische Verhalten von Systemen abgebildet und analysiert werden kann. Es existieren zwei grundlegende Simulationskonzepte: diskrete und kontinuierliche Simulationsmodelle.

Im Bereich der Produktion und Logistik finden vorwiegend objektbasierte ereignisdiskrete Simulationsmodelle Anwendung. Sie besitzen eine sehr hohe Abbildungsgenauigkeit, da in ihnen die Abbildung logistischer Flussprozesse auf Basis einzelner Objekte erfolgen kann. Umfangreiche ereignisdiskrete Simulationsmodelle für Produktions- und Logistiknetzwerke mit vielen Flussobjekten sind oft mit einem hohen Aufwand für Modellerstellung und -berechnung verbunden. Das ist insbesondere dann von Nachteil, wenn aufgrund von Störungen oder anderer Veränderungen eine schnelle Analyse des zu erwartenden Systemverhaltens und eine schnelle Ableitung und Bewertung von Maßnahmen notwendig werden.

Für die Analyse von Produktions- und Logistiksystemen auf strategischer Ebene werden flussorientierte kontinuierliche Simulationsmodelle in Form von System-Dynamics-Modellen genutzt. Durch ihren hohen Abstraktionsgrad sind sie nur unzureichend für die Abbildung verschiedener logistischer Objekttypen und von Steuerungsstrategien geeignet, die bei der Analyse logistischer Flussprozesse auf taktischer und operativer Ebene zu berücksichtigen sind. Sie finden deshalb im Gegensatz zu ereignisdiskreten Modellen bei der Analyse von Produktions- und Logistiksystemen in der Praxis nur sehr selten Anwendung.

Das Ziel der Arbeit ist deshalb die Entwicklung eines Modellierungs- und Simulationsansatzes für die Analyse des dynamischen Verhaltens logistischer Flusssysteme, der folgende Anforderungen erfüllt:

- Schnellere Modellerstellung, Modellanpassung und Modellberechnung als mit ereignisdiskreten Simulationsmodellen
- Größere Abbildungsgenauigkeit logistischer Flussprozesse als mit kontinuierlichen Simulationsmodellen.

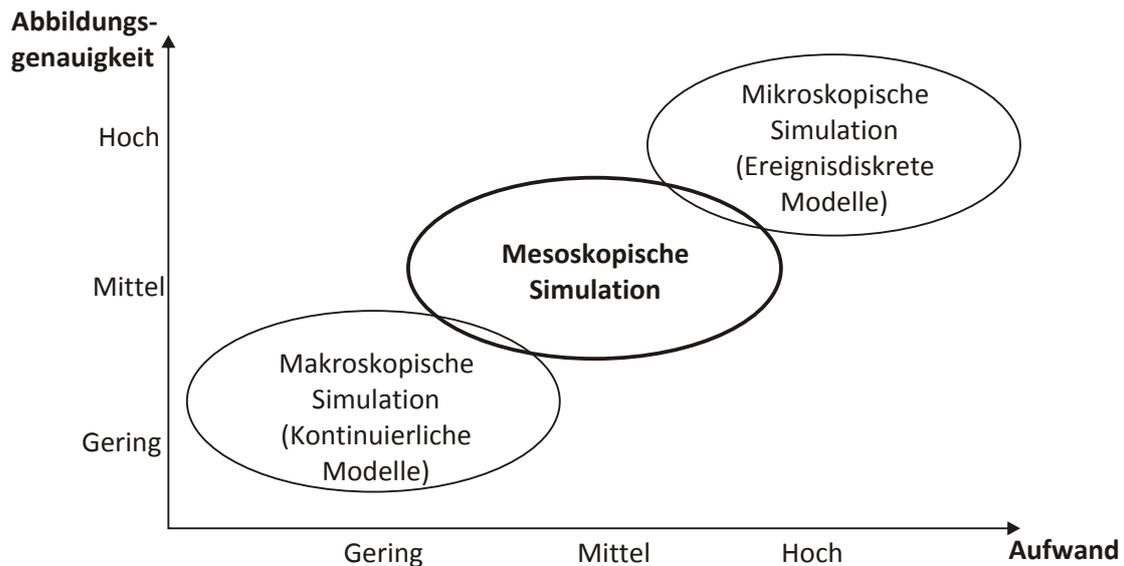


Abbildung 1.1: Einordnung des mesoskopischen Simulationsansatzes

Hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit logistischer Flussprozesse lässt sich der entwickelte Ansatz zwischen mikroskopischen ereignisorientierten und makroskopischen kontinuierlichen Modellen einordnen (siehe Abbildung 1.1) und wird deshalb als mesoskopische Modellierung und Simulation bezeichnet. Der mesoskopische Simulationsansatz ergänzt somit die bestehenden Simulationsansätze.

## 1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

In Kapitel 1 wurden Ausgangssituation und Zielsetzung der Arbeit beschrieben. Um die Zielstellung der Arbeit zu erreichen, wird die in Abbildung 1.2 dargestellte Vorgehensweise gewählt. Kapitel 2 der Arbeit geht auf die Grundlagen der Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme ein. Dazu werden zuerst wichtige Grundbegriffe definiert und erläutert. Anschließend werden existierende Simulationsansätze beschrieben und auf die Anforderung einer schnellen Lösung von Analyse- und Planungsaufgaben in Produktions- und Logistiksystemen hin bewertet.

Kapitel 3 beschreibt die grundlegenden Ideen, auf denen der mesoskopische Modellierungs- und Simulationsansatz basiert und skizziert typische Anwendungsgebiete. Kapitel 4 geht anschließend auf die grundlegenden Prinzipien der mesoskopischen Modellierung und Simulation ein. Es werden das Prozessmodell, das Produktmodell, die Modellelemente und der Simulationsmechanismus des mesoskopischen Ansatzes beschrieben.

Kapitel 5 geht auf die Anwendung des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes ein. Zuerst wird der im Rahmen der Arbeit entwickelte Simulator vorgestellt. Anschließend werden ein Beispiel zur Untersuchung von Strategien zur Ressourcenverteilung und ein Beispiel zur Analyse der Auswirkungen von Störungen der Logistikprozesse

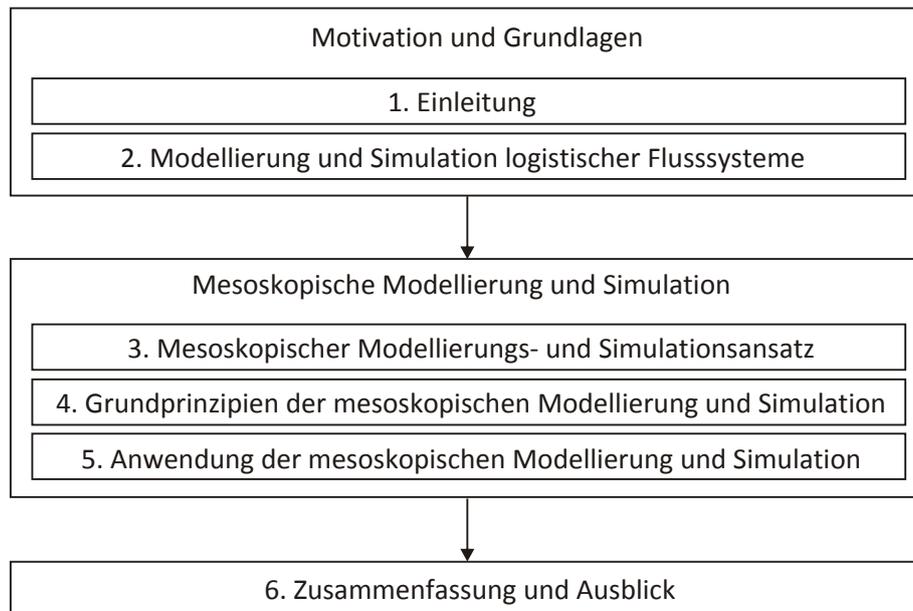


Abbildung 1.2: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

und der Ableitung und Bewertung von Notfallmaßnahmen beschrieben. Kapitel 6 gibt abschließend eine Zusammenfassung und einen Ausblick.



---

## 2 Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Grundlagen der Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme:

- Abschnitt 2.1 definiert und erläutert zunächst grundlegende Begriffe und geht anschließend auf typische Anwendungen der Simulation ein.
- Abschnitt 2.2 beschreibt existierende Modellierungs- und Simulationsansätze und bewertet sie hinsichtlich ihrer Eignung für eine schnelle Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme.

### 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Logistische Flusssysteme

##### Logistik

[Schenk 2003] definiert Logistik als „die Wissenschaft des Gestaltens und Controllings von Prozessen und Strukturen ganzheitlicher Systeme, um individuelle Kundenwünsche zielgerichtet mit effizientem Ressourceneinsatz zu erfüllen“. Nach einer ähnlichen Definition von [Fleischmann 2008, S. 3] ist Logistik die „Gestaltung logistischer Systeme sowie die Steuerung der darin ablaufenden logistischen Prozesse.“ [Baumgarten 2004, S. 2] beschreibt Logistik als „die ganzheitliche Planung, Steuerung, Durchführung und Kontrolle aller unternehmensinternen und -übergreifenden Güter- und Informationsflüsse“. Ähnliche Definitionen gibt es von [Jünemann u. Schmidt 2000, S. 2], die Logistik als „wissenschaftliche Lehre der Planung, Steuerung und Überwachung der Material-, Personen-, Energie- und Informationsflüsse in Systemen“ beschreiben und von [Krampe u. Lucke 2006a, S. 21], die Logistik folgendermaßen definieren: „Logistik beschäftigt sich mit dem gesteuerten Fluss von Gütern, Personen und Informationen in Netzwerken.“

Eine weitere Logistikdefinition, die insbesondere die Aufgaben der Logistik umschreibt, ist die Definition der „6+1 Richtigen“ der Logistik: „Bereitstellungsauftrag und -ziel der Logistik ist

- das richtige Objekt,
- in der richtigen Qualität,
- in der richtigen Menge,
- am richtigen Ort,
- zum richtigen Zeitpunkt,
- zu richtigen (minimalen) Kosten und
- ökologisch richtig

bereitstellen.“ [Ziems 2004, S. 32] Ähnliche Definitionen zu den „Richtigen der Logistik“ finden sich unter anderem bei [Pfohl 2010, S. 12], [Schenk et al. 2010a, S. 226], [Illés et al. 2007, S. 4], [Krampe u. Lucke 2006a, S. 21], [Heidenblut u. ten Hompel 2006, S. 207], [Gudehus 2005, S. 7], [Koether 2004, S. 21] und [Schmigalla 1995, S. 348].

Es gibt eine Vielzahl weiterer, oft ähnlicher Logistikdefinitionen. Übersichten dazu finden sich unter anderem bei [Pfohl 2010, S. 13], der Logistikdefinitionen noch nach flussorientierten, lebenszyklusorientierten und dienstleistungsorientierten Definitionen unterscheidet, und bei [Krampe u. Lucke 2006a, S. 23].

Für die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit soll eine flussorientierte Sicht auf die Logistik im Vordergrund stehen. Eine flussorientierte Sichtweise der Logistik wird unter anderem bei [Fleischmann 2008], [Krampe u. Lucke 2006b], [Gudehus 2005], [Schenk u. Wirth 2004] und [Pfohl 2004] beschrieben.

## Systeme

Systeme bestehen aus Elementen, die untereinander durch Beziehungen verbunden sind [Haberfellner u. Daenzer 2002, S. 5], [Schenk u. Wirth 2004, S. 78], [Lucke 2006, S. 35], [VDI3633 2000]. Am Beispiel eines Fabriksystems ist die Struktur eines Systems in Abbildung 2.1 dargestellt.

Den Elementen eines Systems können Eigenschaften zugeordnet werden. Veränderliche Eigenschaften werden als Zustandsvariablen bezeichnet. Die Menge der Werte aller Zustandsvariablen zu einem bestimmten Zeitpunkt wird als Zustand des Systems bezeichnet. Wenn sich die Werte im Zeitverlauf ändern, ergeben sich Zustandsfolgen. Sie beschreiben das Verhalten des Systems. [Lucke 2006, S. 45], [Page 1991, S. 2], [Frank u. Lorenz 1979, S. 24]

Nach Art der Entstehung von Systemen kann zwischen natürlichen Systemen und künstlichen Systemen unterschieden werden [Hartberger 1991, S. 9], [Frank u. Lorenz 1979,

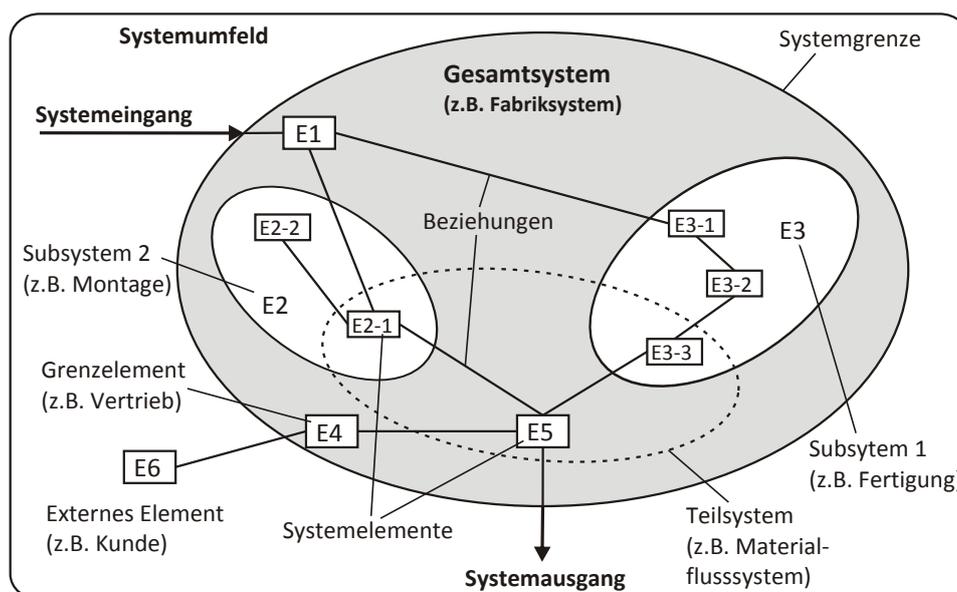


Abbildung 2.1: Systemterminologie [Schenk u. Wirth 2004, S. 80]

S. 23]. Nach dem Verhältnis zur Umgebung können offene und geschlossene Systeme unterschieden werden. Ein offenes System besitzt Beziehungen zur Systemumwelt, ein geschlossenes System nicht. [Page 1991, S. 3], [Hartberger 1991, S. 9] Nach dem zeitlichen Verhalten lassen sich Systeme in statische und dynamische Systeme unterscheiden. In dynamischen Systemen ändert sich der Zustand im Zeitablauf, in statischen Systemen hingegen nicht. [Page 1991, S. 3] Nach dem Grad der Bestimmtheit kann weiterhin zwischen deterministischen und stochastischen Systemen unterschieden werden. Systemklassifizierungen nach weiteren Merkmalen sind unter anderem bei [Schenk u. Wirth 2004], [Bossel 2004] und [Hartberger 1991] zu finden.

## Logistische Flusssysteme

Bezug nehmend auf die zuvor beschriebenen Ausprägungen von Systemen sind logistische Systeme künstliche, offene, dynamische und stochastische Systeme (siehe Abbildung 2.2). Logistische Flusssysteme besitzen feste und bewegliche Elemente. Die festen Elemente bilden die Struktur des Systems, durch die die beweglichen Elemente fließen [Lucke 2006, S. 36].

Ein logistisches System dient der Durchführung logistischer Prozesse und hat die Struktur eines Netzwerkes [Fleischmann 2008, S. 3], (vgl. auch [Arnold u. Furmans 2007, S. 2]). „Ein Prozess ist eine Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder auch Information umgeformt, transportiert oder auch gespeichert wird.“ [DIN19226 1994] Ein Prozess ist somit die zeitliche Folge von Zustandsübergängen in einem System [Frank 1999, S. 52], (vgl. auch [Lucke 2006, S. 45]). Nach [Arnold u. Furmans 2007, S. 1] können alle wesentlichen technischen Vorgänge bei

Entstehungsart	natürlich	künstlich
Verhältnis zur Umgebung	geschlossen	offen
Zeitabhängigkeit	statisch	dynamisch
Grad der Bestimmtheit	deterministisch	stochastisch

	Merkmalsausprägungen logistischer Flusssysteme
--	--

Abbildung 2.2: Merkmalsausprägung logistischer Flusssysteme

der Produktion und beim Vertrieb von Konsum- und Investitionsgütern folgenden Oberbegriffen zugeordnet werden: „Bearbeiten, Montieren, Prüfen, Handhaben, Fördern (Transportieren), Lagern (Speichern, Puffern), Sammeln, Verteilen, Sortieren, Verpacken.“

Die in einem Produktions- und Logistiksystem ablaufenden Prozesse können als Flüsse in einem Flusssystem dargestellt werden [Schenk u. Wirth 2004, S. 81], [Arnold u. Furmans 2007, S. 1], [Fleischmann 2008, S. 3], weswegen im Rahmen dieser Arbeit von logistischen Flusssystemen gesprochen wird. Ausführungen zu den Grundlagen der Flusssystemtheorie sind bei [Schenk u. Wirth 2004] und [Wirth 1989] zu finden. Abbildung 2.3 zeigt beispielhaft die Struktur eines logistischen Flusssystems mit dem Materialfluss von den Zulieferern über Lager, Produzenten und Verteilzentren bis zu den Kunden.

Unabhängig von den Objekten (Sachgüter, Personen, Tiere, Informationen oder Energie), die durch ein Netzwerk aus Knoten und Kanten fließen, kann von Logistiksystemen gesprochen werden [Pfohl 2010, S. 5]. Eine Übersicht zur Klassifizierung von Gütern findet sich bei [Illés et al. 2007, S. 5].

## 2.1.2 Modellierung und Simulation

### Modell und Modellierung

„Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.“ [VDI3633 2000, S. 3], (vgl. u. a. auch [Krampe et al. 2006, S. 83], [Arnold u. Furmans 2007, S. 56], [Domschke u. Drexl 2005, S. 3], [Schmigalla 1995, S. 243])

Ein Modell wird genutzt, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung mittels direkter Operationen am Original nicht möglich oder zu aufwendig wäre [Frank u. Lorenz 1979, S. 26]. „Der Prozess der Überführung eines Realitätsausschnitts in ein

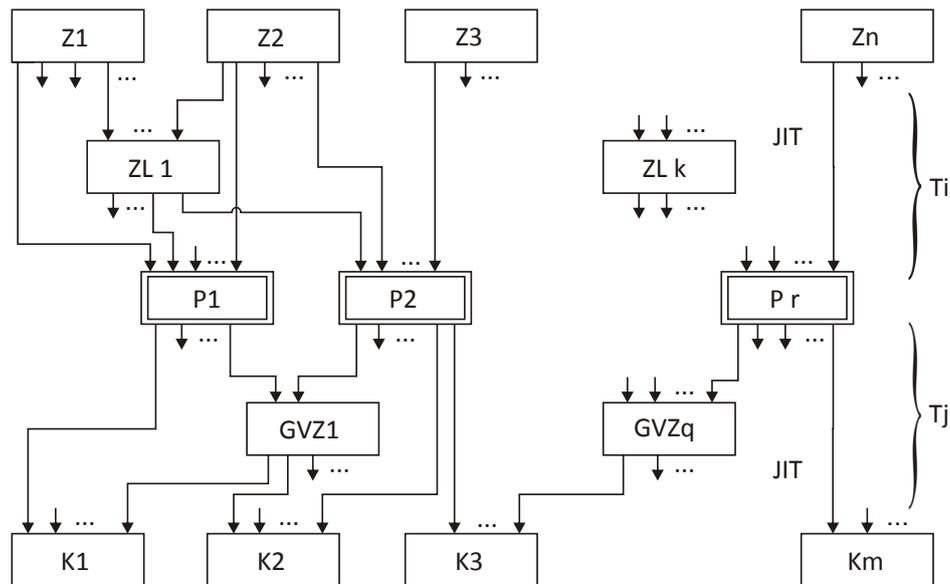


Abbildung 2.3: Materialfluss in einem Logistiknetzwerk mit mehreren Zulieferern (Z), Zulieferlagern (ZL), Produktherstellern (P), Güterverteilzentren (GVZ), Kunden (K) und Transportunternehmen (T), JIT = Just-in-Time [Arnold u. Furmans 2007, S.6]

Modell wird als Modellierung bezeichnet.“ [Schenk u. Wirth 2004, S.177]

### Modellklassifikationen

Modelle können nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert werden. Eine in der Literatur häufig zu findende Einteilung von Modellen bezieht sich auf ihren Einsatzzweck und unterscheidet:

- Beschreibungsmodelle,
- Erklärungs- und Kausalmodelle,
- Prognosemodelle und
- Entscheidungs- bzw. Optimierungsmodelle.

[Scholl 2008, S.36], (vgl. auch [Nyhuis u. Wiendahl 2007, S.1021], [Domschke u. Drexl 2005, S.3], [Page 1991, S.7])

Nach dem Abbildungsmedium kann grundlegend zwischen materiellen Modellen und immateriellen Modellen unterschieden werden (siehe Abbildung 2.4). Im Rahmen dieser Arbeit werden nur immaterielle Modelle betrachtet. Immaterielle Modelle können weiter in informale und formale Modelle unterteilt werden. Simulationsmodelle sind immaterielle und formale Modelle und können rein mathematisch oder grafisch-mathematisch

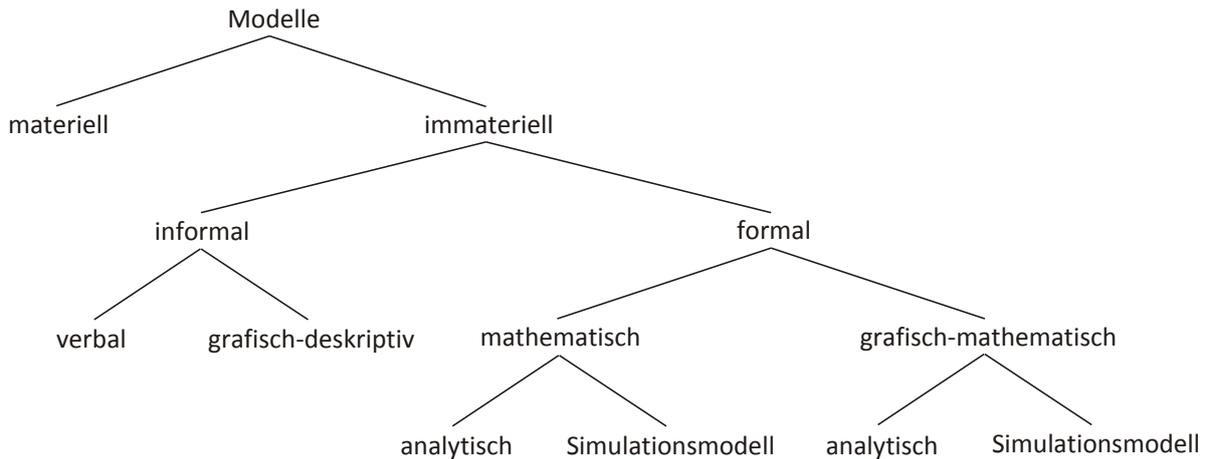


Abbildung 2.4: Klassifikation von Modellen nach Abbildungsmedium und Untersuchungsmethode [Page 1991, S. 5]

beschrieben werden. Zusätzlich ist in Abbildung 2.4 noch die Unterscheidung nach der Untersuchungsmethode abgebildet. Mathematische und grafisch-mathematische Modelle können entweder analytisch oder simulativ untersucht werden.

Nach Art der verwendeten Daten kann zwischen qualitativen und quantitativen (mathematischen) Modellen unterschieden werden [Scholl 2008, S. 36], (vgl. auch [Arnold u. Furmans 2007, S. 48]):

- Qualitative Modelle arbeiten mit qualitativen, d. h. ordinal oder nominal messbaren Daten, die jedoch häufig auf subjektiven Einschätzungen beruhen. Um qualitative Modelle formal auswerten zu können, ist eine Quantifizierung der qualitativen Daten notwendig. [Scholl 2008, S. 36]
- Quantitative (mathematische) Modelle arbeiten mit kardinal messbaren Daten und können mit mathematischen Methoden ausgewertet werden [Scholl 2008, S. 36]. Die Anwendung quantitativer Methoden zur Vorbereitung optimaler Entscheidungen wird auch als Operations Research bezeichnet [Zimmermann u. Stache 2001, S. 2], [Domschke u. Drexl 2005, S. 1].

Ausführlichere Klassifikationen von Modellen finden sich unter anderem bei [Schenk u. Wirth 2004], [VDI3633 2000] und [Page 1991].

### Mathematische Modelle

„Das mathematische Modell eines realen Systems oder Prozesses ist eine Gesamtheit formaler Beziehungen, die den Zusammenhang der Zustandsvariablen mit anderen Systemparametern, den Anfangsbedingungen und Eingangsgrößen des Systems oder Prozesses beschreibt.“ [Frank u. Lorenz 1979, S. 29], (vgl. auch [Law u. Kelton 2007, S. 5]) Mathematische Modelle können in

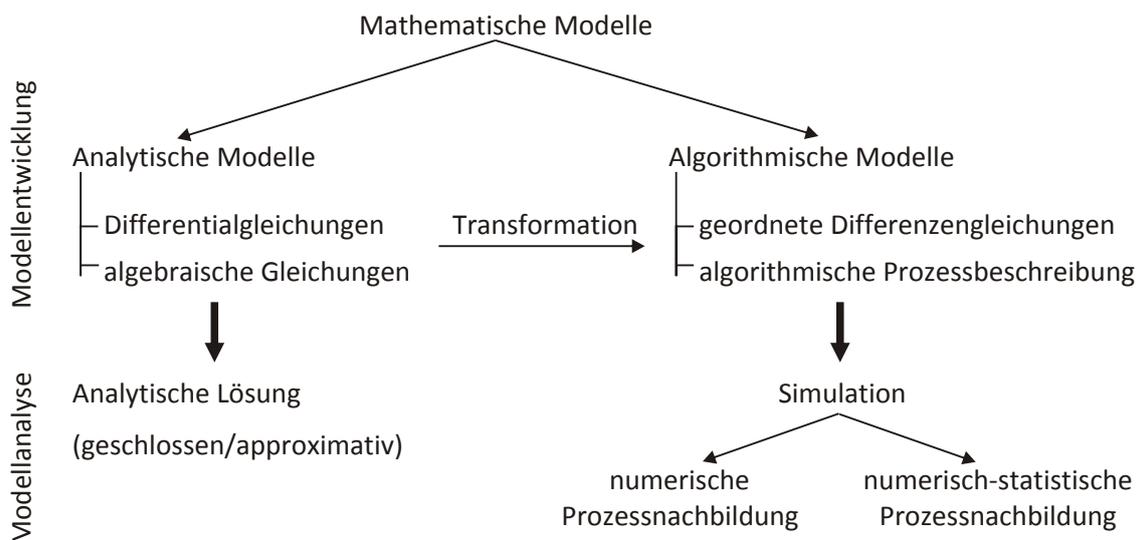


Abbildung 2.5: Mathematische Modelle [Frank 1999, S. 51]

- analytische Modelle und
- algorithmische Modelle

unterteilt werden (siehe Abbildung 2.5).

Aussagen aus analytischen Modellen können entweder durch analytische Umformungen des Modells oder simulativ mit numerischen Verfahren nach einer erfolgten Modelltransformation getroffen werden [Frank 1999, S. 51], [Kramer u. Neculau 1998, S. 65], [Zimmermann u. Stache 2001, S. 4]. Aussagen aus algorithmischen Modellen können mit Hilfe der Simulation gewonnen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden unter analytischen Modellen nur solche Modelle verstanden, die sich mit analytischen Verfahren berechnen lassen. Analytische Modelle, die sich nur numerisch berechnen lassen, werden den Simulationsmodellen zugeordnet. Dazu gehören zum Beispiel auf Differentialgleichungen basierende Modelle für logistische Systeme, die sich in den meisten Fällen nicht mehr analytisch, sondern nur noch numerisch berechnen lassen. Nachfolgend wird zuerst auf analytische Modelle und anschließend auf Simulationsmodelle eingegangen.

### Analytische Modelle

In einem analytischen Modell werden die „Zusammenhänge zwischen den Zustandsvariablen, Parametern, Anfangsbedingungen und Eingangsinformationen des Systems in Form analytischer (funktionaler) Ausdrücke (algebraische, Integral-, Differential- bzw. Differenzgleichungen)“ beschrieben [Frank u. Lorenz 1979, S. 32]. Analytische Modelle sind mathematische Modelle, die eine geschlossene Form haben und „das Problem mit mathematischen Ausdrücken (Gleichungssystemen) exakt beschreiben“ [Hartberger 1991,

S. 42]. Bei analytischen Verfahren wird „die Lösung [...] durch einen formelmäßigen Ausdruck oder endlichen Rechenprozess gewonnen, der mathematisch zur exakten Lösung führt“ [Zimmermann u. Stache 2001, S. 4], (vgl. auch [Page 1991, S. 4]).

Der Vorteil analytischer Modelle liegt in der exakten Beschreibung des Problems in einer geschlossenen mathematischen Form, was bei nicht zu komplizierten Modellen eine Berechnung der Lösung und auch eine Optimierung der Modelle ermöglicht.

Produktions- und Logistiksysteme sind offene, dynamische und stochastische Systeme [Hartberger 1991, S. 9], [Kosturiak u. Gregor 1995, S. 4], [Feldmann u. Reinhart 2000, S. 17]. Damit existieren häufig Einflussgrößen in der Realität, die sich nicht oder nicht exakt durch analytisch lösbare Modelle beschreiben lassen [Law u. Kelton 2007, S. 76], [Hartberger 1991, S. 42]. Wenn das zu modellierende System zu kompliziert ist, kann meist kein analytisches Modell aufgestellt werden beziehungsweise gibt es keine geeigneten analytischen oder numerischen Lösungsverfahren für die analytischen Modelle zur Ermittlung der gewünschten Informationen [Frank u. Lorenz 1979, S. 32]. „Analytische mathematische Verfahren (Warteschlangentheorie, lineare Programmierung u. a.) stoßen wegen ihrer Einschränkungen bei der Lösung praktischer Probleme auf erhebliche Schwierigkeiten.“ [Kosturiak u. Gregor 1995, S. 15] Aus diesen Gründen sind analytische Modelle nicht für die Abbildung des Gesamtverhaltens logistischer Systeme geeignet [Hartberger 1991, S. 43], [Law u. Kelton 2007, S. 76].

Analytische Modelle sind für Teilbereiche komplexer Produktions- und Logistiksysteme [Hartberger 1991, S. 44] und die Grobplanung von Produktionssystemen geeignet, da sie nicht alle relevanten Systemabläufe beschreiben können [Buzacott u. Yao 1986, S. 892 ff.]. Sie können als Berechnungsverfahren in der Vorstufe einer Simulationsstudie dienen, zum Beispiel für eine Bestimmung der Leistungsgrenzen, eine Engpassermittlung und eine grobe Pufferdimensionierung [Hartberger 1991, S. 44 ff.].

In der Logistik verwendete analytische Modelle sind vorwiegend bedientheoretische Modelle und Optimierungsmodelle. Bedientheoretische Modelle werden unter anderem bei [Furmans 2008], [Arnold u. Furmans 2007], [Ziems u. Gueorguiev 1999], [Lorenz 1984] und Optimierungsmodelle unter anderem bei [Zimmermann 2008], [Domschke u. Drexel 2005], [Tempelmeier 2005], [Homburg 1998], [Günther et al. 2007] behandelt. Eine Übersicht zu analytischen Modellen für flexible Fertigungssysteme findet sich bei [Buzacott u. Yao 1986].

Bedientheoretische Modelle stoßen an ihre Grenzen, wenn es um eine detaillierte Abbildung geht und Steuerungsstrategien (z. B. abhängig vom Systemzustand) abgebildet werden sollen [Furmans 2008, S. 72]. Die Annahmen und Voraussetzungen der Warteschlangentheorie sind in realen Produktionssystemen nicht erfüllt. Weiterhin ist eine Modellanpassung meist nicht möglich, was jedes Mal eine aufwendige Erstellung eines neuen Modells notwendig macht. [Nyhuis u. Wiendahl 2007, S. 1025] Die Abbildungsgüte der Warteschlangentheorie ist im Anwendungsfeld Produktion nicht befriedigend und liefert

teilweise unsinnige Ergebnisse [Lorenz 1984, S. 52 ff.]. Die Markov-Theorie und die Warteschlangentheorie sind nur beschränkt für die Untersuchung des Gesamtverhaltens eines komplexen Produktionssystems einsetzbar [Hartberger 1991, S. 44].

Optimierungsmodelle lassen sich nicht anwenden, wenn Logistikprobleme zu komplex werden [Pfohl 2004, S. 298]. Graphenmodelle und Algorithmen aus dem Operations Research sind nicht zur Bestimmung des Gesamtsystemverhaltens geeignet, sondern nur für Zuweisungs- und Transportprobleme [Hartberger 1991, S. 43]. „Optimierungsrechnungen betreffen vorwiegend Teilplanungen, bei Gesamtplanungen kann die Simulation nützlich sein.“ [Domschke u. Drexl 2005, S. 1]

Analytische Modelle haben tendenziell engere Modellannahmen als Simulationsverfahren, weswegen Simulationsmodelle eine größere Flexibilität haben und in ihnen Sachverhalte berücksichtigt werden können, die in analytischen Modellen nicht berücksichtigt werden können [Helber 2008, S. 121]. Um die Gesamtheit des dynamischen Verhaltens von logistischen Systemen abbilden zu können, sind Simulationsmodelle deswegen wesentlich besser als analytische Modelle geeignet. [Hartberger 1991, S. 42] Mit Hilfe der Simulation ist es möglich, komplexere Systeme in Modelle zu fassen als mit analytischen Modellen. Simulationsmodelle sind flexibler und universeller einsetzbar als analytische Modelle. [Kosturiak u. Gregor 1995, S. 69]

## Simulationsmodelle

„Ein mathematisches Modell eines Systems (oder Prozesses) heißt ein algorithmisches Modell, wenn es den originalen Prozessverlauf in Form struktur- und zeitgerechter Wertveränderungen der einzelnen Zustandsvariablen – in Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen, Parametern und Eingangsinformationen – mittels elementarer Operationen und Bedingungen in algorithmischer Verknüpfung widerspiegelt.“ [Frank u. Lorenz 1979, S. 32] „Ein Algorithmus ist eine geordnete endliche Folge von elementaren Operationen und Bedingungen zur Umformung von Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen, wobei nach Ausführung einer Operation eindeutig feststeht oder an Hand einer Bedingung entschieden werden kann, welche Operation beim nächsten Schritt auszuführen oder ob das Verfahren abzubrechen ist.“ [Frank u. Lorenz 1979, S. 30] Algorithmische Modelle werden auch als Simulationsmodelle bezeichnet [Frank u. Lorenz 1979, S. 33] und sind geeignet, das Gesamtverhalten von logistischen Systemen im Zeitablauf darzustellen.

Vom Begriffsverständnis her gibt es mindestens drei verschiedene gebräuchliche Definitionen für den Begriff Simulation [Frank 1999, S. 50 ff.]:

- „Experimentieren mit Modellen“,
- „Entwicklung von Modellen und deren experimentelle Nutzung zur Analyse und Bewertung des Verhaltens“,

- „Nachahmung des Verhaltens eines realen Systems mittels eines dynamischen Modells“, d. h. „die modellgestützte Nachahmung von Prozessen“.

Im Rahmen dieser Arbeit wird folgende Definition verwendet: „Simulation ist ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ [VDI3633 2000, S. 2] Diese Definition entspricht der oben genannten zweiten Definition, da sie auch die Modellierung mit einschließt. Eine Simulationsstudie beinhaltet das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell (siehe Abbildung 2.6). Die oben genannte dritte Definition fasst den Simulationsbegriff enger und beinhaltet nur die Simulation selbst, was im Vorgehensmodell nach [VDI3633 2000] dem Schritt Durchführung des Simulationsexperiments entspricht.

Simulationsmodelle lassen anhand der drei Dimensionen Zeitverhalten, Zufallsverhalten und Zeitablauf unterscheiden (siehe Abbildung 2.7).

In Bezug auf das Zeitverhalten kann zwischen *statischen* und *dynamischen* Simulationsmodellen [Law u. Kelton 2007, S. 5], [VDI3633 2000, S. 14] unterschieden werden. Statische Modelle bilden keine zeitlichen Veränderungen des Systemzustands ab, dynamische Modelle hingegen erlauben eine Abbildung der zeitlichen Veränderungen des Systemzustands. Im Sinne der vorher aufgeführten Definition für Simulation werden im Rahmen dieser Arbeit nur dynamische Simulationsmodelle betrachtet. Statische stochastische Experimente wie zum Beispiel mit dem Monte Carlo Verfahren werden im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Simulation gezählt.

Bezüglich des Zufallsverhaltens lassen sich *deterministische* und *stochastische* Simulationsmodelle unterscheiden. Ein deterministisches Modell enthält keine Zufallskomponenten. Werden Zufallseinflüsse betrachtet, spricht man von stochastischen Modellen. [Law u. Kelton 2007, S. 6], [Banks 2005, S. 13], [VDI3633 2000, S. 14]

Hinsichtlich des Zeitablaufs kann zwischen *diskreten* und *kontinuierlichen* Simulationsmodellen unterschieden werden [Law u. Kelton 2007, S. 6], [Banks 2005, S. 11] (siehe Abbildung 2.8). In der Literatur zu Materialflusssystemen werden als Synonyme für den Begriff diskret teilweise auch die Begriffe sprunghaft oder diskontinuierlich verwendet und für den Begriff kontinuierlich auch der Begriff stetig [Arnold u. Furmans 2007, S. 48], [Förster 1983, S. 21], [Großeschallau 1984, S. 179], [Krampe 1990, S. 102]. In dieser Arbeit werden die Begriffe diskret und kontinuierlich genutzt, da sie im Bereich der Simulation am verbreitetsten sind.

In „einem diskreten Modell ändern sich die Werte der Zustandsvariablen [...] sprunghaft zu bestimmten, auf der Zeitachse diskret verteilten Zeitpunkten,“ [Page 1991, S. 6]. Für die Abbildung des Systemverhaltens logistischer Systeme finden hauptsächlich *ereignisdiskrete* Simulationsmodelle (siehe Abbildung 2.8a) Anwendung, auf die in Abschnitt 2.2.2 näher eingegangen wird. In ihnen ändern sich die Zustandsvariablen aufgrund von Ereignissen. In ereignisdiskreten Modellen sind paradoxerweise Zeitachse und Zustandsachse gewöhn-

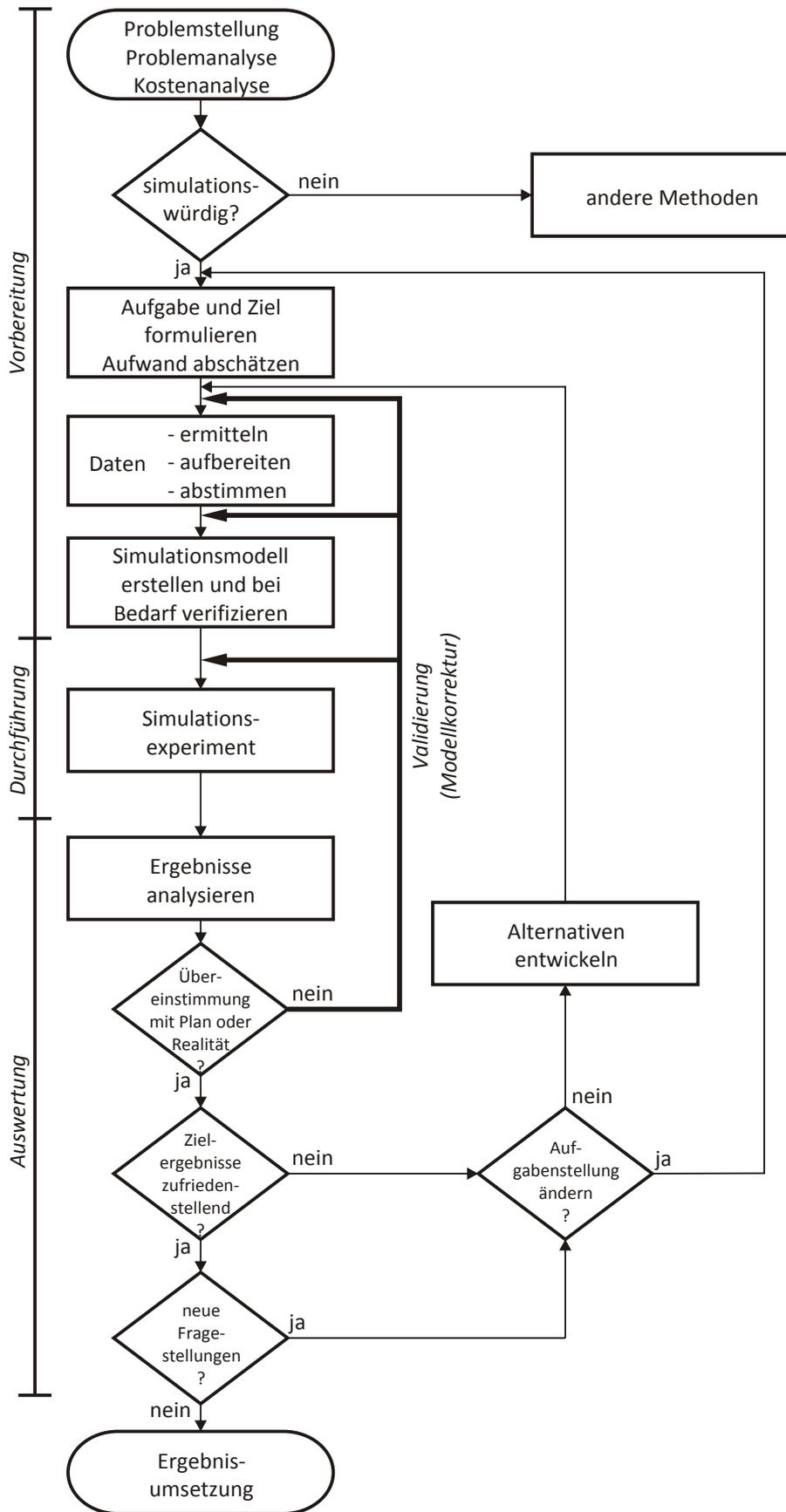


Abbildung 2.6: Ablauf einer Simulationsstudie (in Anlehnung an [VDI3633 2000, S. 11])

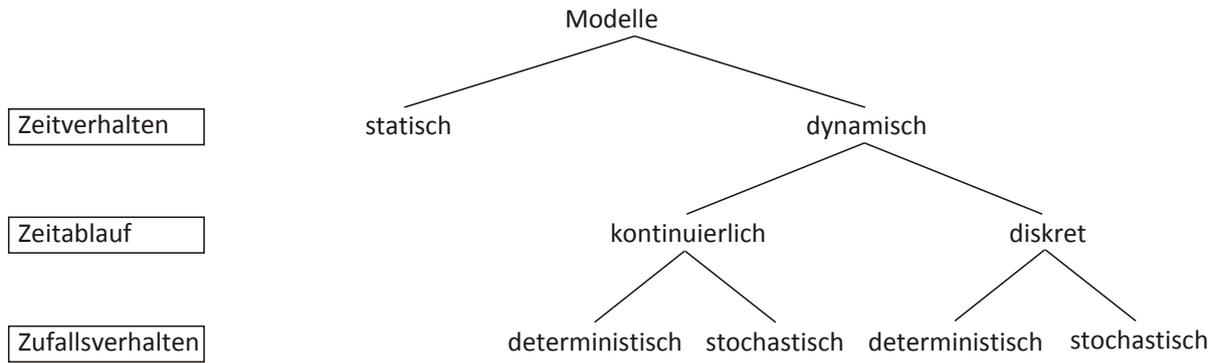


Abbildung 2.7: Klassifikation von Simulationsmodellen (in Anlehnung an [Page 1991, S. 6])

licherweise kontinuierlich, allerdings kann innerhalb einer endlichen Zeitspanne nur eine endliche Anzahl von Zustandsänderungen stattfinden [Cellier 1991, S. 14]. In ereignisdiskreten Modellen für logistische Systeme ist die Zustandsachse jedoch oft diskretisiert, weil logistische Flussobjekte als einzelne Objekte und nicht als Flussgrößen modelliert werden. Genauso kann die Zeitachse diskretisiert sein, wenn Ereignisse aufgrund der gegebenen Randbedingungen nur zu bestimmten Zeitpunkten auftreten können (vgl. [Pritsker 1995, S. 52]).

In kontinuierlichen Modellen (siehe Abbildung 2.8b) ändern sich die Zustandsvariablen kontinuierlich über die Zeit [Banks 2005, S. 12], [Liebl 1995, S. 9]. Anders ausgedrückt lässt sich auch sagen, dass zeitkontinuierliche Modelle dadurch charakterisiert sind, dass sich innerhalb einer endlichen Zeitspanne der Zustand unendlich oft ändert. Zeitkontinuierliche Modelle werden durch Differentialgleichungssysteme dargestellt. [Cellier 1991, S. 12] Für die Modellierung logistischer Systeme auf strategischer langfristiger Ebene finden auf Differentialgleichungen basierende Modelle in Form von System-Dynamics-Modellen Anwendung, die in Abschnitt 2.2.3 näher beschrieben werden.

Eine weitere Modellklasse sind *zeitdiskrete* Modelle. In diesen Modellen wird die Zeitachse durch äquidistante Zeitschritte diskretisiert (siehe Abbildung 2.8c). Zeitdiskrete Modelle werden üblicherweise durch Systeme von Differenzgleichungen dargestellt. Für zeitdiskrete Modelle mit nicht äquidistanten Zeitschritten wird meist eine ereignisdiskrete Darstellung bevorzugt. [Cellier 1991, S. 12 ff.]

Zeitdiskrete Modelle werden unter anderem benutzt, um kontinuierliche Modelle auf digitalen Computern berechnen zu können. Letztendlich müssen alle kontinuierlichen Modelle diskretisiert werden, wenn sie auf digitalen Computern berechnet werden, so dass die Gesamtzahl der Zeitschritte, zu denen Zustandsänderungen berechnet werden, endlich bleibt [Cellier u. Kofman 2005, S. 11]. Wird der Modellzeitschritt hinreichend klein gewählt, so verhalten sich die Modelle annähernd kontinuierlich. Deswegen wird im Rahmen dieser Arbeit auch weiterhin von kontinuierlichen Modellen gesprochen, wenn es sich

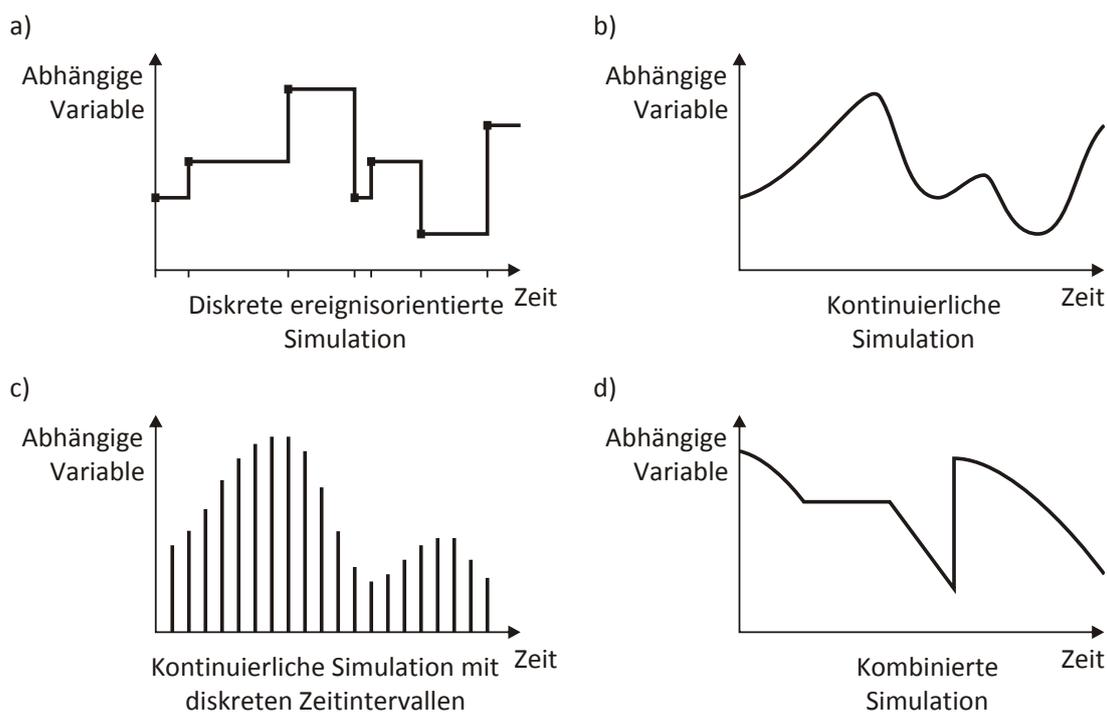


Abbildung 2.8: Simulationsarten (in Anlehnung an [ASIM 1997, S. 5] und [Pritsker 1995, S. 52 ff.] )

um für die Computerberechnung diskretisierte kontinuierliche Modelle mit hinreichend kleinen Zeitschritten handelt (vgl. [Bossel 1994, S. 38]). Zeitdiskrete Modelle auf Basis konstanter Zeitschritte werden auch als quasikontinuierliche Simulationsmodelle bezeichnet (vgl. [VDI3633 2000, S. 14]).

Fast alle real existierenden Systeme sind nicht vollständig diskret oder kontinuierlich. Da aber meist eine der beiden Eigenschaften vorherrschend ist, lässt sich für die Modellierung in Abhängigkeit der Modellierungsziele eine entsprechende Einordnung vornehmen [Law u. Kelton 2007, S. 3]. Je nach Untersuchungsziel kann es durchaus zielführend sein, ein diskretes System mit einem kontinuierlichen Modell oder ein kontinuierliches System mit einem diskreten Modell abzubilden. Dabei ist es Aufgabe des Modellierers, die Korrektheit des Modells im Rahmen der Zielsetzung der Modellierungsaufgabe zu gewährleisten. Die Modellierung kontinuierlicher Prozesse durch ereignisdiskrete Modelle kann jedoch zu Problemen im Spannungsfeld Modellierungsgenauigkeit und Rechenaufwand führen.

Es gibt aber auch Prozesse, die sich besser mit einer Kombination aus kontinuierlicher und ereignisdiskreter Simulation abbilden lassen, wie zum Beispiel der Ankunfts- und Entladeprozess von Öltankern [Pritsker 1995, S. 354 ff.]. Aus diesem Grund sind sogenannte hybride oder kombinierte Modellierungsansätze entstanden, die sowohl kontinuierliche als auch diskrete Elemente enthalten (siehe Abbildung 2.8d).

Über die Merkmale Zeitverhalten, Zufallsverhalten und Zeitablauf hinausgehende Klas-



Abbildung 2.9: Simulation im Lebenszyklus von technischen Systemen [VDI3633 2000, S. 4]

sifizierungen von Simulationsmodellen sind unter anderem bei [Scholl 2008], [Law u. Kelton 2007], [Hömberg et al. 2007], [Banks 2005], [Schmidt 2002], [Wenzel 2000], [Feldmann u. Reinhart 2000], [Kosturiak u. Gregor 1995], [Hartberger 1991] zu finden. Ausführliche theoretische Grundlagen zu den Modellierungsformalismen von ereignisdiskreten Systemen (DEVs), zeitdiskreten Systemen (DTSS), kontinuierlichen Systemen (DESS) und kombinierten ereignisdiskreten und kontinuierlichen Systemen (DEV&DESS) finden sich bei [Zeigler et al. 2000]. Die Arbeit von [Kofman 2003] beschäftigt sich mit der ereignisdiskreten Simulation und Steuerung kontinuierlicher Systeme.

### Anwendung von Simulationsmodellen

Simulationsmodelle finden bei der Abbildung des zeitlichen Verhaltens von Produktions- und Logistiksystemen Anwendung. Sie werden im gesamten Lebenszyklus eines technischen Systems von der Planung über die Realisierung bis hin zum Betrieb genutzt (siehe Abbildung 2.9), wobei die Planungsphase der klassische Einsatzfall ist [Kuhn u. Rabe 1998, S. 7].

Nachfolgend werden beispielhaft typische Fragestellungen bei der Planung, bei der Realisierung und beim Betrieb von Produktions- und Logistiksystemen aufgeführt, deren Bearbeitung nach [VDI3633 2000, S. 3 ff.] und [Kuhn u. Rabe 1998, S. 7 ff.] mit Simulati-

onsmodellen unterstützt wird:

- Planungsphase
  - Modifizierung bestehender Systeme
    - \* Ermittlung von Kapazitätsgrenzen
    - \* Ermittlung von Schwachstellen
    - \* Bewertung der Wirkungen von Veränderungen hinsichtlich Kapazitäten, Produkten, Produktionsplänen, Systemstrukturen
  - Neuplanung
    - \* Funktionsnachweis
    - \* Untersuchungen zu Dimensionierung, Ablauflogik, Steuerungskriterien, Durchsatz, Leistungsgrenzen, Engpässen, Durchlaufgeschwindigkeit und Bestandsbildung
- Realisierungsphase
  - Ermittlung des Anlaufverhaltens
  - Leistungstest bei schrittweiser Kapazitätsauslastung
  - Überprüfung der Auswirkungen von Anforderungsveränderungen und von Problemen
  - Testen von Steuerungssoftware
  - Bestimmen von Notfallstrategien
- Betriebsphase
  - Vergleichende Bewertung von Ablaufvarianten
  - Vorausschauende Untersuchung von Strategien und Reaktionen auf Störfälle und Veränderungen
  - Untersuchung langfristiger Entwicklungstrends
  - Dispositionsalternativen in der Fertigungssteuerung
  - Variantenuntersuchung zur operativen Entscheidungsfindung
  - Überprüfen von Notfallstrategien oder von Sofortmaßnahmen
  - Variantenuntersuchungen
  - Simulation im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) bei folgenden Aufgaben:
    - \* Produktionsprogrammplanung

- \* Mengenplanung
- \* Termin- und Kapazitätsplanung
- \* Auftragsfreigabe
- \* Auftragsüberwachung.

Nach [Reinhart u. Feldmann 1997, S. 3] haben Ablaufsimulationen typischerweise folgende Planungsinhalte:

- Anlagenlayout
- Materialfluss/Logistik
- Systemleistung
- Fertigungsprinzip
- Steuerstrategien
- Entstörstrategien.

Eine Studie von [Reinhart u. Feldmann 1997, S. 19] ergab, dass Ablaufsimulationen vorrangig eine Funktionsauslegung und -optimierung und einen Funktionsnachweis zum Ziel haben.

Eine Vielzahl von Fallbeispielen zur Anwendung der Simulation in Produktion und Logistik findet sich unter anderem in den Tagungsbänden der ASIM-Fachtagungen „Simulation in Produktion und Logistik“ (z. B. [Rabe 2008], [Wenzel 2006]), in den online verfügbaren Beiträgen der Winter Simulation Conference (z. B. [Rossetti et al. 2009], [Mason et al. 2008] und [Henderson et al. 2007]), in den Beiträgen zur Tagung Simulation und Visualisierung SimVis (z. B. [Schulze et al. 2007], [Schulze et al. 2006]) oder auch bei [Kuhn u. Rabe 1998] und [Merkuryev et al. 2009].

## 2.2 Simulationskonzepte

In diesem Abschnitt werden Simulationskonzepte beschrieben, die im Umfeld von Produktion und Logistik Anwendung finden und in den Standardsimulatoren implementiert sind. Weiterhin werden die Simulationsansätze hinsichtlich ihrer Eignung für eine schnelle Analyse des dynamischen Verhaltens größerer Logistiksysteme bewertet.

### 2.2.1 Einleitung

Generell kann zwischen diskreten und kontinuierlichen Simulationsansätzen unterschieden werden (siehe Abbildung 2.10):

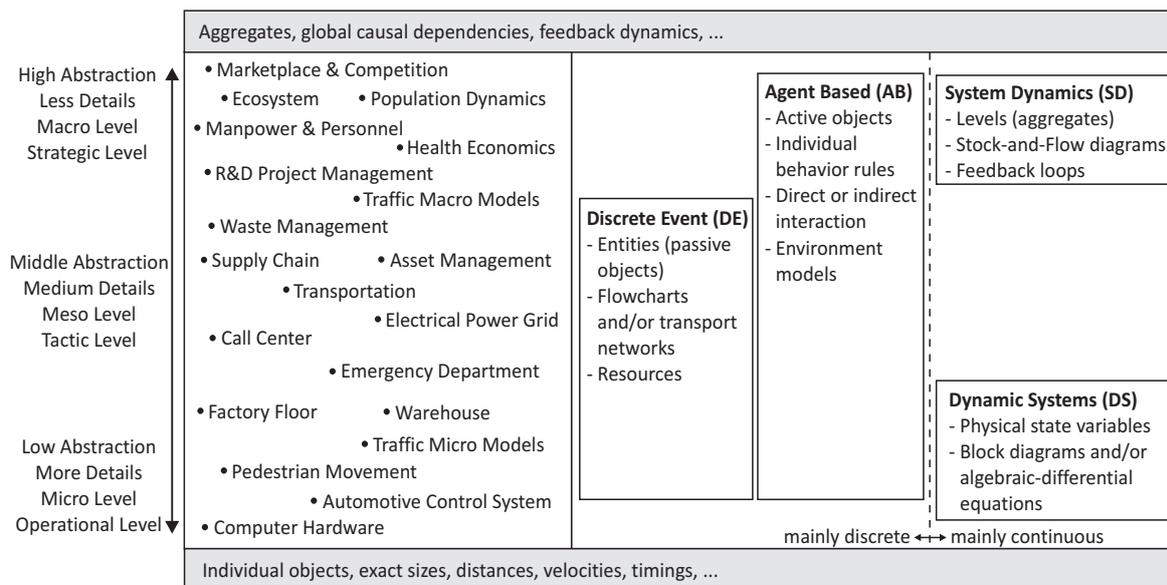


Abbildung 2.10: Aggregationsebenen und Simulationsparadigmen (in Anlehnung an [Borshchev u. Filippov 2004, S. 2 ff.] )

- Abschnitt 2.2.2 beschreibt den in Produktion und Logistik am häufigsten genutzten Ansatz der ereignisdiskreten Simulation.
- Abschnitt 2.2.3 behandelt den System-Dynamics-Ansatz als Vertreter der kontinuierlichen Simulation.
- Abschnitt 2.2.4 beschäftigt sich mit der Kombination von diskreter und kontinuierlicher Simulation.
- In Abschnitt 2.2.5 wird der Ansatz der Discrete-Rate-Simulation beschrieben. Dieser Ansatz wird bisher in den Standardwerken zur Simulation gar nicht oder nur am Rande erwähnt, wie bei [Banks et al. 2009, S. 145]. Der Ansatz wurde für kontinuierliche lineare Prozesse entwickelt, wie sie zum Beispiel bei der Herstellung von Pulvern und Flüssigkeiten in der Nahrungsmittelindustrie oder bei Highspeed/High-volume-Prozessen (z. B. Verpackungsprozesse oder Abfüllprozesse) vorzufinden sind. Die Discrete-Rate-Simulation ermöglicht eine schnelle Simulation und ordnet sich bezüglich der Abbildungsgenauigkeit zwischen den klassischen ereignisdiskreten und kontinuierlichen Ansätzen ein. Aus diesen Gründen erscheint der Ansatz der Discrete-Rate-Simulation vielversprechend als Basismechanismus für den zu entwickelnden mesoskopischen Simulationsansatz und soll deswegen näher betrachtet werden.
- Abschnitt 2.2.6 fasst in Tabelle 2.1 die wesentlichen Eigenschaften des ereignisdiskreten, des Discrete-Rate- und des System-Dynamics-Ansatzes vergleichend zusammen.

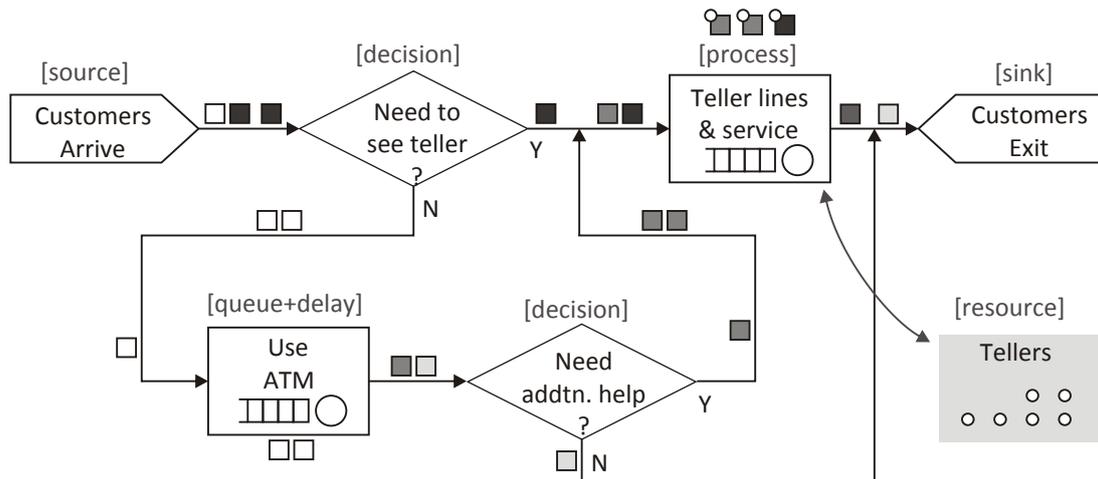


Abbildung 2.11: Flussdiagramm der diskreten ereignisorientierten Simulation: Bankschalter in Arena [Borshchev u. Filippov 2004, S. 6]

Die bei [Borshchev u. Filippov 2004] (siehe Abbildung 2.10) weiterhin dargestellte agentenbasierte Simulation und die dynamischen Systeme werden hier nicht weiter betrachtet. Agentenbasierte Modelle sind bisher hauptsächlich ein akademisches Thema und dynamische Systeme haben ihre Anwendung bei der direkten Abbildung physischer Systeme auf einer sehr geringen Abstraktionsebene [Borshchev u. Filippov 2004].

## 2.2.2 Ereignisdiskrete Simulation

Der in der Logistik am häufigsten genutzte Simulationsansatz ist der ereignisdiskrete Simulationsansatz. Es gibt zahlreiche Veröffentlichungen, die diesen Ansatz beschreiben, wie beispielsweise [Banks et al. 2009], [Schriber u. Brunner 2008], [Law u. Kelton 2007], [Fishman 2001], [Kuhn u. Rabe 1998], [Liebl 1995], [Kosturiak u. Gregor 1995], [Page 1991] und [Frank u. Lorenz 1979]. Der ereignisdiskrete Simulationsansatz bietet sich im Bereich der Logistik an, da die meisten Logistikprozesse diskreter Natur sind [Scholz-Reiter et al. 2007, S. 6].

Der Begriff diskrete ereignisorientierte Simulation in der Logistik basiert auf dem Konzept von Objekten, Ressourcen und Flowcharts, die den Objektfluss und die Ressourcennutzung beschreiben [Borshchev u. Filippov 2004, S. 6]. In Abbildung 2.11 ist ein typisches Flussdiagramm der ereignisdiskreten Simulation dargestellt.

Ereignisdiskrete Simulationsmodelle können logistische Systeme in beliebiger Detailliertheit darstellen, da in ihnen einzelne logistische Objekte abgebildet werden können. Umfangreiche ereignisdiskrete Simulationsmodelle mit vielen Flussobjekten, wie zum Beispiel für Produktions- und Logistiknetzwerke, sind bedingt durch die Abbildung einzelner Objekte durch einen hohen Aufwand für Modellerstellung und -berechnung gekennzeichnet. (vgl. [Kuhn u. Rabe 1998, S. 3], [Law u. Kelton 2007, S. 2], [Feldmann u. Reinhart

2000, S. 22], [Scholz-Reiter et al. 2008, S. 118], [Kosturiak u. Gregor 1995, S. 65 ff.]) Ereignisdiskrete Modelle sind deshalb nur bedingt für eine schnelle Modellierung und Simulation größerer Produktions- und Logistiksysteme geeignet.

Charakteristisch für ereignisdiskrete Modelle ist, dass sich der Systemzustand nur zu den Zeitpunkten ändert, an denen Ereignisse auftreten. Ereignisse sind mit Orts- oder Zustandsänderungen der abgebildeten Flussobjekte verbunden. Die Simulationszeit schreitet von Ereignis zu Ereignis voran. Ereignisse werden in verschiedenen Ereignislisten (z. B. zukünftige Ereignisliste und aktuelle Ereignisliste) verwaltet [Banks 2005, S. 68 ff.]. Auf das Prozessmodell der ereignisdiskreten Simulation wird in Abschnitt 4.2.1 näher eingegangen.

Ein Simulationsprojekt setzt sich aus Simulationsexperimenten zusammen. Simulationsexperimente unterscheiden sich bezüglich der Modelllogiken und/oder der Modelldaten und -parameter. [Schriber u. Brunner 2008, S. 183] Innerhalb eines Simulationsexperiments ist aufgrund der den meisten ereignisdiskreten Simulationsmodellen für logistische Systeme zugrunde liegenden Stochastik eine bestimmte Mindestanzahl von Simulationsläufen notwendig, um zu statistisch gesicherten Aussagen zu kommen. Das führt zu einem hohen Zeitaufwand. (vgl. [Dobler et al. 2008, S. 509], [Scholz-Reiter et al. 2008, S. 118])

### 2.2.3 System-Dynamics-Modelle

System Dynamics ist ein kontinuierlicher flussorientierter Ansatz, der von einzelnen Ereignissen und Objekten auf eine aggregierte strategische Sicht abstrahiert [Borshchev u. Filippov 2004, S. 4]. System Dynamics wurde in den fünfziger Jahren durch Forrester unter dem Namen Industrial Dynamics zur Untersuchung des Verhaltens dynamischer Systeme in der Industrie entwickelt: „Industrial Dynamics is the study of information-feedback characteristics of industrial activity to show how organizational structure, amplification (in policies), and time delays (in decisions and actions) interact to influence the success of the enterprise. It treats the interaction between the flows of information, money, orders, materials, personnel, and capital equipment in a company, an industry, or a national economy.“ [Forrester 1961, S. 13] Aufgrund seiner Allgemeingültigkeit und der damit verbundenen Anwendbarkeit in anderen Forschungsgebieten wurde Industrial Dynamics später als System Dynamics bezeichnet [Schöneborn 2004, S. 34].

System Dynamics wird hauptsächlich für langfristige und strategische Fragestellungen eingesetzt [Borshchev u. Filippov 2004], [Größler 2007, S. 73]. Die erste in breiter Öffentlichkeit bekannte Anwendung war die Studie „Grenzen des Wachstums“ des MIT, die durch den Club of Rome beauftragt wurde [Schöneborn 2004, S. 45]. Verbreitete Anwendungen sind die sogenannten Weltmodelle, in denen es um globale Probleme wie das Bevölkerungswachstum, die Nahrungsmittelversorgung, den Bestand und Ver-

brauch natürlicher Ressourcen und die Umweltverschmutzung geht. Weitere Anwendungen sind makroökonomische Entwicklungen, Krankheits- und Epidemieentwicklungen oder die Abbildung von Stadt-, sozialen und ökologischen Systemen. [Schöneborn 2004, S. 45 ff.], [Borshchev u. Filippov 2004] Einen umfassenden Überblick zum System-Dynamics-Ansatz und zu seinen Anwendungen gibt [Sterman 2000]. Eine Übersicht zu betriebswirtschaftlichen Anwendungen findet sich bei [Schöneborn 2004, S. 58 ff.] und eine Übersicht zu Anwendungen in der Supply-Chain-Modellierung bei [Angerhofer u. Angelides 2000]. [Lyneis 1980] beschreibt die Anwendung von System Dynamics für die Unternehmensplanung und -strategie. Die Nutzung von System Dynamics für betriebswirtschaftliche und volkswirtschaftliche Fragestellungen wird von [Coyle 1977] behandelt.

[Scholz-Reiter et al. 2006] nutzen den System-Dynamics-Ansatz zur Untersuchung von Strategien zur Bestandsregelung in Produktionsstätten, Produktionsnetzwerken und Supply Chains. In [Scholz-Reiter et al. 2005] wird der System-Dynamics-Ansatz mit dem ereignisdiskreten Ansatz bei der Modellierung selbststeuernder Logistikprozesse verglichen.

Mit der Nutzung des System-Dynamics-Ansatzes ist nicht immer vordergründig die Aufgabe verbunden, ein analytisch lösbares Modell abzuleiten [Größler 2007, S. 80]. Allein die Erstellung der Ursache-Wirkungs-Diagramme in der Phase der konzeptionellen Modellierung kann oft entscheidend zum Systemverständnis beitragen.

Die Anzahl der Veröffentlichungen zur Anwendung von System-Dynamics-Modellen für Produktions- und Logistiksysteme ist jedoch wesentlich geringer als die zur Anwendung ereignisdiskreter Modelle. Zum einen sind aggregierte System-Dynamics-Modelle oft nicht für eine adäquate Abbildung von Produktions- und Logistiksystemen geeignet und zum anderen beobachten [Borshchev u. Filippov 2004, S. 4], dass in der universitären Ausbildung System Dynamics hauptsächlich in den Wirtschaftswissenschaften gelehrt wird und diskrete ereignisorientierte Simulation hauptsächlich im Umfeld des Industrial Engineering, was auch zu verschiedenen Anwendungsgemeinschaften geführt hat.

In System-Dynamics-Modellen wird zwischen „Bestands-/(Zustands-) und Fluss-(Änderungs-)größen“ unterschieden [Schöneborn 2004, S. 44]. Bestände (stocks), Flüsse (flows) und Rückkopplungen (feedbacks) und deren Darstellung in „stock-and-flow“-Diagrammen sind die zentralen Konzepte von System Dynamics (vgl. [Sterman 2000]). Abbildung 2.12 zeigt beispielhaft ein System-Dynamics-Modell eines Logistiksystems als „stock-and-flow“-Diagramm. Prozesse der realen Welt werden durch Bestände (Material, Wissen, Menschen, Geld etc.), Flüsse zwischen den Beständen und Informationen, die die Größe der Flüsse bestimmen, abgebildet [Borshchev u. Filippov 2004, S. 4].

Die Bestände in System-Dynamics-Modellen

- charakterisieren den Systemzustand und bilden die Grundlage für Entscheidungen und Handlungen,
- bilden die Trägheit und ein Gedächtnis beziehungsweise einen Speicher ab,

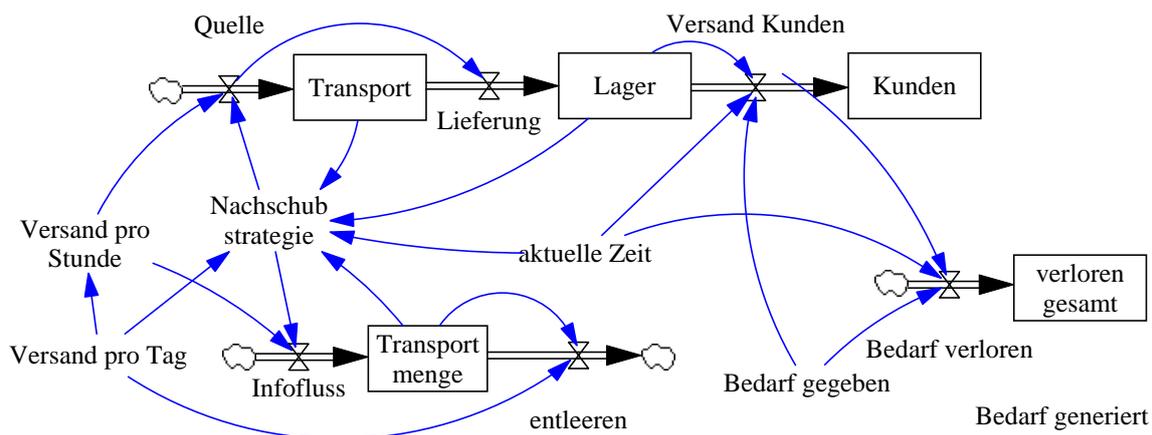


Abbildung 2.12: System-Dynamics-Modell [Schenk et al. 2009a]

- bilden Verzögerungen durch Akkumulation der Differenzen zwischen In- und Outputflüssen ab und
- entkoppeln Flussraten und erzeugen dadurch dynamische Ungleichgewichte [Sterman 2000, S. 191 ff.].

Die „stock-and-flow“-Diagramme werden als ein System von nichtlinearen gewöhnlichen Differentialgleichungen formuliert, das die Veränderung jeder einzelnen Größe durch Integration über die Zeit für die betrachteten Perioden simultan berechnet [Schöneborn 2004, S. 44], [Sterman 2000, S. 903]. Die einheitliche Notation mit „stock-and-flow“-Diagrammen ist ein großer Vorteil der Modellierung mit System Dynamics. Die vorhandenen Softwaretools ermöglichen eine grafische und intuitive Modellierung ohne tieferes Verständnis der mathematischen Zusammenhänge. Es erfolgt automatisch eine numerische Simulation der erstellten Modelle. Ein weiterer Vorteil liegt in der schnellen Ausführung der Simulation. [Scholz-Reiter et al. 2008, S. 121]

Auf das Modell zur zeitlichen Abbildung der Flussprozesse in System-Dynamics-Modellen wird in Abschnitt 4.2.2 näher eingegangen. Die Standardtools für System-Dynamics-Modelle ermöglichen zusätzlich zu einer kontinuierlichen Modellierung auch die Nutzung von diskreten Elementen [Scholz-Reiter et al. 2008, S. 121], [Coyle 1985], [Ventana-Systems 2007].

Es lässt sich zusammenfassen, dass der System-Dynamics-Ansatz eine schnelle Modellierung und Simulation von Flussystemen ermöglicht, jedoch auf einer aggregierten Ebene, so dass eine direkte Anwendung für viele logistische Problemstellungen nicht in Frage kommt.

### 2.2.4 Kombinierte diskret-kontinuierliche Simulation

Es gibt Prozesse, die sich besser mit einer Kombination aus kontinuierlicher und ereignisdiskreter Simulation abbilden lassen, wie zum Beispiel der Beladungsprozess von Schiffen mit Kohle [Kelton et al. 2010, S. 481] oder der Transport und das Be- und Entladen von Öltankern [Pritsker 1995, S. 354 ff.]. Aus diesem Grund sind sogenannte kombinierte oder hybride Modellierungsansätze entstanden, in denen sich die abhängigen Variablen sowohl kontinuierlich als auch diskret ändern können [Pritsker 1995, S. 61], [Cellier 1986, S. 24 ff.] (siehe Abbildung 2.8d). Üblicherweise wird mit solchen kombinierten Modellen die diskrete Steuerung von Flussprozessen oder verfahrenstechnischen Produktionsprozessen dargestellt.

In kombinierten Simulationsmodellen können sich die abhängigen Variablen diskret, kontinuierlich oder kontinuierlich mit diskreten Sprüngen ändern. Die Zeitvariable kann kontinuierlich oder diskret sein. [Pritsker 1995, S. 53] In kombinierten Simulationsmodellen gibt es drei grundlegende Formen zur Verknüpfung von sich diskret ändernden und sich kontinuierlich ändernden Zustandsvariablen [Pritsker 1995, S. 61 ff.]:

- Ein diskretes Ereignis kann eine diskrete Änderung des Wertes einer kontinuierlichen Zustandsvariablen bewirken.
- Ein diskretes Ereignis kann die Beziehungen, die das Verhalten einer kontinuierlichen Zustandsvariablen bestimmen, zu einem bestimmten Zeitpunkt ändern.
- Das Erreichen eines definierten Grenzwertes durch eine kontinuierliche Zustandsvariable kann ein diskretes Ereignis auslösen.

Sowohl Simulatoren für ereignisdiskrete Simulation auf dem Gebiet der Logistik als auch Softwaretools für kontinuierliche Simulation bieten die Möglichkeit einer kombinierten Simulation an [Law u. Kelton 2007, S. 3], [Cellier 1986, S. 24 ff.]. Der kontinuierliche Teil des Modells wird dabei mit konstanten Zeitschritten berechnet. Das ist von Vorteil, wenn nichtlineare Aspekte eine Rolle spielen. [Damiron u. Nastasi 2008, S. 742] Für kontinuierliche lineare Systeme ist dieses Vorgehen mit Nachteilen verbunden. Ein zu großer Zeitschritt führt zu einer ungenauen Abbildung des Systemverhaltens. Ein kleiner Zeitschritt erhöht die Abbildungsgenauigkeit, erhöht jedoch den Rechenaufwand.

Die kombinierte diskret-kontinuierliche Simulation liefert keinen prinzipiell neuen Ansatz. Es werden lediglich ereignisdiskrete und kontinuierliche Simulation kombiniert. Aus diesem Grund wird dieser Ansatz nicht weiter betrachtet.

### 2.2.5 Discrete-Rate-Simulation

Der Begriff und das Konzept der Discrete-Rate-Simulation sind im Vergleich zu den bereits seit längerer Zeit existierenden ereignisdiskreten und kontinuierlichen Ansätzen noch

relativ jung. Zur Discrete-Rate-Simulation gibt es vergleichsweise wenig Literatur. In den Standardwerken zur Simulation wird die Discrete-Rate-Simulation gar nicht oder nur am Rande erwähnt. Aus diesen Gründen werden die Grundlagen der Discrete-Rate-Simulation in diesem Abschnitt ausführlicher beschrieben als die anderen Ansätze.

Die Discrete-Rate-Simulation ist ein Simulationsansatz für die Simulation von linearen Flusssystemen und von hybriden Systemen, in denen die Flussprozesse durch lineare kontinuierliche Prozesse beschrieben werden können, was für eine Reihe von Flusssystemen zutrifft. Vorrangige Anwendungsgebiete sind:

- Prozesse mit hoher Geschwindigkeit und hohem Durchsatz, wie z. B.
  - Verpackungsprozesse und
  - Abfüllprozesse,
- Verarbeitung von Pulvern, Flüssigkeiten, Gasen und Schüttgut, wie z. B. in der
  - Nahrungsmittelindustrie,
  - pharmazeutischen Industrie,
  - petrochemischen Industrie,
  - Rohstoffindustrie und
  - Wasseraufbereitung.

[Damiron u. Nastasi 2008], [Krahl 2009]

Konkrete Anwendungen der Discrete-Rate-Simulation im Produktionsumfeld, die in der Literatur beschrieben werden, sind beispielsweise:

- Flaschenproduktion mit den Schritten Formen, Blasformen, Dichtheitsprüfung und Palettierung [Krahl 2009, S. 336 ff.],
- Herstellung von Furnierplatten [Krahl 2008, S. 220],
- Flaschenabfüllung [Phelps et al. 2002, S. 182 ff.] und
- Joghurtproduktion [Imagine-That 2007, S. 276].

Ein Ausschnitt aus einem mit dem Softwarepaket ExtendSim mitgelieferten Discrete-Rate-Modell, welches die Joghurtproduktion abbildet, ist in Abbildung 2.13 dargestellt. In der Abbildung sind die beiden grundlegenden Modellelemente eines Discrete-Rate-Modells dargestellt: Tanks und Ventile. Discrete-Rate-Modelle ähneln in der Darstellung somit System-Dynamics-Modellen, wo die gleichen Grundelemente (Behälter und Ventile) genutzt werden. Darüber hinaus bieten Discrete-Rate-Modelle jedoch noch andere Modellelemente und Funktionen, die sie auch in der Darstellung von System-Dynamics-Modellen unterscheiden. Der Unterschied zwischen beiden Ansätzen besteht in der Art

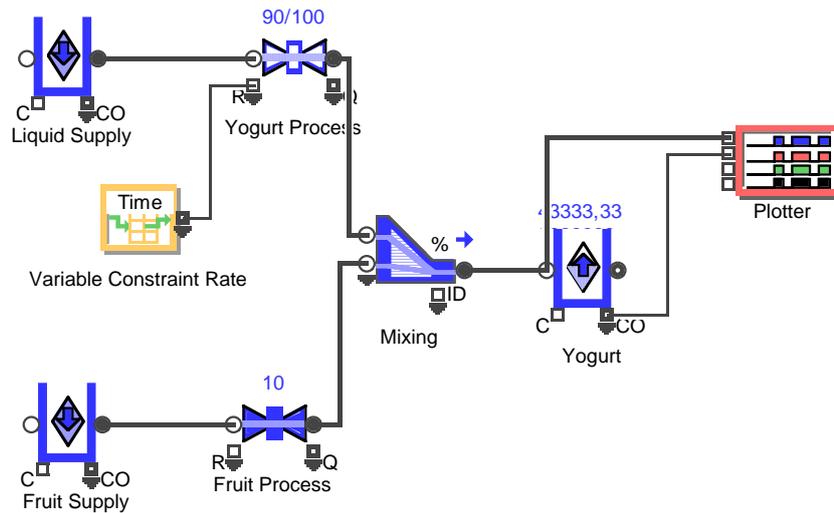


Abbildung 2.13: Beispiel eines Discrete-Rate-Simulationsmodells mit Tanks und Ventilen  
(Quelle: Screenshot eines ExtendSim Beispielmmodells)

und Weise der Abbildung von Zustandsänderungen über der Zeit. In System-Dynamics-Modellen ändert sich der Systemzustand aufgrund des Voranschreitens der Simulationszeit. In Discrete-Rate-Modellen ändert sich der Systemzustand bei Eintreten eines Ereignisses.

Wieso ist es zur Entwicklung des Discrete-Rate-Simulationsansatzes gekommen? Ereignisdiskrete Modelle und kontinuierliche Modelle haben bei der Abbildung linearer kontinuierlicher Flussprozesse entscheidende Nachteile. Ereignisdiskrete Modelle sind mit einem sehr hohen Aufwand verbunden, wenn Flussysteme mit vielen Flussobjekten auf Objektebene abgebildet werden. Eine Aggregation in ereignisdiskreten Modellen führt zu Genauigkeitsverlusten und macht es schwieriger, Steuerungslogiken abzubilden. Kontinuierliche Modelle sind zu ungenau. [Sturrock u. Drake 1996, S. 432 ff.], [Filmer et al. 1994, S. 124 ff.]

Die Discrete-Rate-Simulation kombiniert Eigenschaften kontinuierlicher und ereignisdiskreter Simulationsmodelle [Imagine-That 2007, S. 45]:

- Discrete-Rate-Modelle arbeiten wie kontinuierliche Modelle mit Flussraten.
- Änderungen der Flussraten sind mit Ereignissen verbunden. Zwischen zwei Ereignissen bleiben die Flussraten konstant. Die resultierenden Bestandsgrößen sind demzufolge stückweise linear. Abbildung 2.14 zeigt den zeitlichen Verlauf von Fluss- und Bestandsgrößen in einem Discrete-Rate-Modell.

Die Annahme stückweise konstanter Flussraten ist, wie der Name schon sagt, die Kernidee der Discrete-Rate-Simulation. Stückweise konstante Inputs und Outputs sind Voraussetzung für eine exakte ereignisdiskrete Darstellung kontinuierlicher Systeme [Zeigler

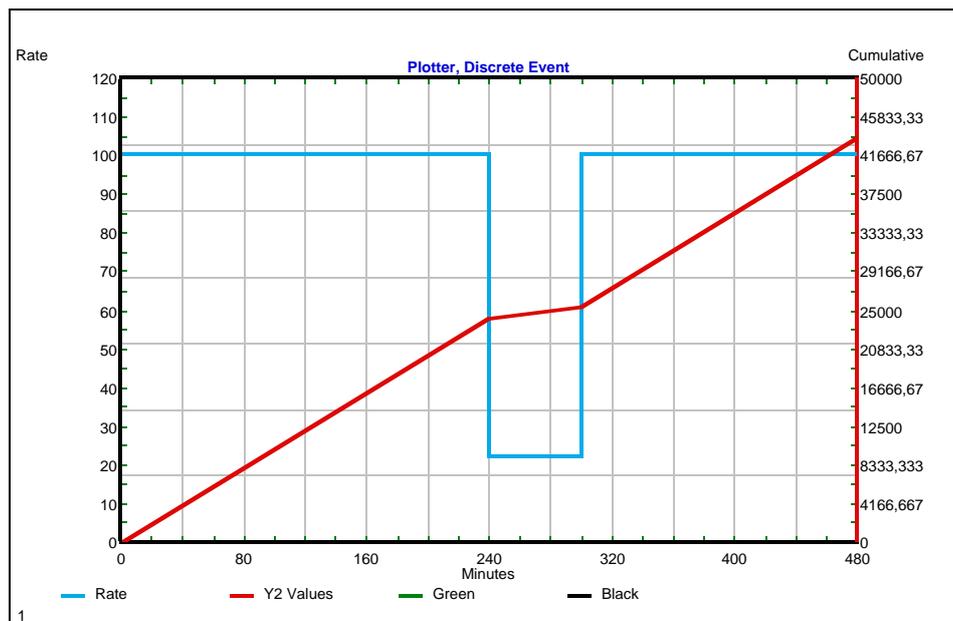


Abbildung 2.14: Zeitlicher Verlauf von Flussrate und Bestandsgröße in einem Discrete-Rate-Simulationsmodell (Quelle: Screenshot eines ExtendSim Beispielmmodells)

et al. 2000, S. 207]. Eine detaillierte Betrachtung des Prozessmodells der Discrete-Rate-Simulation erfolgt in Abschnitt 4.2.3.

Bei der Anwendung für lineare kontinuierliche Systeme hat die Discrete-Rate-Simulation aufgrund der beschriebenen Eigenschaften gegenüber der kontinuierlichen Simulation Vorteile hinsichtlich der benötigten Rechenzeit und Genauigkeit:

- Die Discrete-Rate-Simulation minimiert durch das ereignisbasierte Vorgehen im Vergleich zur kontinuierlichen Simulation die Anzahl der notwendigen Berechnungen, da nur bei Änderungen der Flussraten eine neue Berechnung durchgeführt wird. Es ist nicht mehr notwendig, den Systemzustand über eine zeitliche Diskretisierung mit hinreichend kleinen Zeitschritten und dem damit verbundenen schrittweisen Vorschreiten der Simulationszeit zu berechnen. Aufgrund der Linearität kann die zeitliche Entwicklung der Zustandsvariablen vorausberechnet werden und bei Erreichen vorher definierter Werte können Ereignisse geplant werden.
- Discrete-Rate-Modelle sind genauer als kontinuierliche Modelle, da aufgrund der linearen Bestandsentwicklung die zeitliche Entwicklung der Zustandsvariablen vorausberechnet werden kann und bei Erreichen vorher definierter Werte Ereignisse geplant werden können. Damit können Steuerungen zum genauen Zeitpunkt eingeplant werden.

Gegenüber der ereignisdiskreten Simulation reduziert die Discrete-Rate-Simulation den

Berechnungsaufwand, da keine einzelnen Objekte im Modell verfolgt werden.

Die beschriebenen Vorteile der Discrete-Rate-Simulation werden am Beispiel der Berechnung der Befüllungs- und Leerungsprozesse an einem Tank sehr anschaulich durch [Damiron u. Nastasi 2008, S. 743 ff.] beschrieben.

### **Entwicklung der Discrete-Rate-Simulation**

Erste Ansätze der Discrete-Rate-Simulation wurden bei [Siprelle u. Parsons 1995], [Siprelle u. Phelps 1997] und [Siprelle et al. 1998] beschrieben, ohne den Begriff Discrete-Rate-Simulation zu nutzen. [Siprelle et al. 1999] erwähnen den Begriff Discrete-Rate-Simulation und beschreiben die Umsetzung innerhalb der Simulationssoftware SDI Industry.

SDI Industry war ein Simulationstool von Simulation Dynamics, das als Erweiterung zu Extend genutzt werden konnte und später in Extend integriert wurde. Ein Element von SDI Industry waren Discrete-Rate-Flow-Bausteine, die für die Abbildung von

- High-volume- und Highspeed-Prozessen (z. B. Massenproduktion, Verpackungsprozesse) und
- physischen Flussprozessen, die durch lineare kontinuierliche Flüsse beschrieben werden können,

gedacht waren. Ausführlicher und mit Beispielen wurde die Discrete-Rate-Simulation dann in [Phelps et al. 2000], [Phelps et al. 2001] und [Phelps et al. 2002] beschrieben.

Die Ideen hinter dem Ansatz der Discrete-Rate-Simulation sind jedoch nicht neu. Es gibt eine Reihe von Ansätzen, die aufgrund der oben genannten Nachteile von kontinuierlichen und ereignisdiskreten Modellen entwickelt wurden und denen ähnliche Ideen wie bei der Discrete-Rate-Simulation zu Grunde liegen. Dazu zählen unter anderem die Arbeiten von Pritsker zu Verpackungsprozessen [Siprelle et al. 1999], die Arbeiten von [Filmer et al. 1994] aus dem Bereich von Hochgeschwindigkeits-Verpackungslinien, die Arbeiten von [Sturrock u. Drake 1996] zur Simulation von Hochgeschwindigkeits-Produktionsprozessen aber auch Ansätze aus der Nahrungsmittelindustrie.

Mittlerweile ist die Discrete-Rate-Simulation Bestandteil der Simulationssoftware ExtendSim 7. Discrete-Rate-Simulation wird dort als drittes grundlegendes Simulationsparadigma neben den klassischen Ansätzen der ereignisdiskreten und kontinuierlichen Simulation betrachtet. Ausführliche Beschreibungen der Discrete-Rate-Simulation befinden sich in [Imagine-That 2007], [Krahl 2007], [Krahl 2008], [Krahl 2009] und [Damiron u. Nastasi 2008].

### **Ähnliche Ansätze**

Es gibt Simulationsansätze, die dem Discrete-Rate-Ansatz ähneln. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf die Discrete-Rate-Simulation eingegangen, da die Umsetzung der

Discrete-Rate-Simulation bereits in einem Standardsimulationstool erfolgt ist. Ein Konzept, welches hier erwähnt werden soll, sind die hybriden Simulationsmodelle für Produktionsnetzwerke von [Kouikoglou u. Phillis 2001]. Vorarbeiten zu diesem Ansatz finden sich in [D'Angelo et al. 1988], [Kouikoglou u. Phillis 1991] und [Kouikoglou u. Phillis 1997]. Der Ansatz verfolgt ein ähnliches Prinzip wie die Discrete-Rate-Simulation. Diskrete impulsförmige Flussprozesse werden durch Flüsse mit stückweise konstanten Flussraten approximiert. Es werden hybride ereignisdiskrete Modelle entwickelt, die aufgrund der linearen Entwicklung der Bestandsgrößen die neuen Systemzustände analytisch berechnen können. Somit wird eine Reduktion der zu simulierenden Zustandsübergänge und letztendlich eine schnellere Simulation erreicht.

### 2.2.6 Fazit

Die wesentlichen Eigenschaften der ereignisdiskreten Simulation, der Discrete-Rate-Simulation und der kontinuierlichen System-Dynamics-Simulation werden in Tabelle 2.1 noch einmal zusammengefasst.

Die vorhergehenden Abschnitte haben aufgezeigt, dass die existierenden Modellierungs- und Simulationsansätze Nachteile bei der Modellierung und Simulation größerer Logistiksysteme haben. Die in der Logistik am häufigsten genutzten ereignisdiskreten Modelle können bei größeren Systemen schnell sehr aufwendig bei der Modellierung und sehr langsam bei der Simulation werden. Kontinuierliche Modelle sind für die meisten logistischen Aufgabenstellungen zu aggregiert. Modelle der Discrete-Rate-Simulation ermöglichen eine schnelle Simulation und sind für lineare kontinuierliche Prozesse genauer als kontinuierliche Simulationsmodelle. Discrete-Rate-Modelle wurden jedoch bisher noch nicht für Logistiksysteme angewendet, da ihr Produktmodell, das den Fluss zwischen zwei Knoten eines Netzwerkes mit nur einer Variablen beschreibt, für viele logistische Aufgabenstellungen zu grob ist.

Ziel der Arbeit ist deshalb die Entwicklung eines Simulationsansatzes, der auf der einen Seite eine schnellere Modellerstellung und -berechnung als mit ereignisdiskreten Modellen ermöglicht und auf der anderen Seite im Vergleich zu existierenden flussbasierten Ansätzen für eine Reihe von logistischen Analyse- und Planungsaufgaben noch hinreichend genau ist und eine Ergänzung zu den existierenden Konzepten darstellt.

Tabelle 2.1: Simulationsansätze im Vergleich

	<b>Ereignisdiskrete Simulation</b>	<b>Discrete-Rate-Simulation</b>	<b>System Dynamics</b>
Anwendung	Logistikprozesse auf Objektebene	Lineare kontinuierliche Prozesse	Aggregierte Logistikprozesse (Einproduktmodelle)
Software-Tools (Auswahl)	Plant Simulation, AutoMod	ExtendSim, Arena	Vensim, Powersim
Genauigkeit	Hoch	Gering – Mittel	Gering
Aufwand	Hoch	Gering – Mittel	Gering
Abbildung logistischer Flussprozesse	Einzelne Objekte (Forderungen), die durch ein System von Ressourcen (Bedienstationen) fließen	Ratenbasiertes Flusssystem; homogene Massengutströme, die durch das Modell fließen	Werte, die durch das Modell fließen; Bestände und Flüsse („stock-and-flow“-Darstellung), Feedbacks
Produktmodell	Einzelne Flussobjekte	Eine Variable für den Fluss zwischen zwei Knoten des Netzwerkes, einzelne Flussobjekte nicht unterscheidbar	Eine Variable für den Fluss zwischen zwei Knoten des Netzwerkes, einzelne Flussobjekte nicht unterscheidbar
Hauptmodell-elemente (Systemstruktur)	Logistikspezifische Ressourcen, Warteschlangen	Tanks, Ventile, Förderstrecken	Behälter und Ventile
Zustandsänderungen durch	Ereignisse bezüglich Orts- und Zustandsänderungen der Objekte	Ereignisse bezüglich Änderungen der Flussraten	Voranschreiten der Simulationszeit
Zeitschritt	Variabel	Variabel	Konstant
Eignung für schnelle Modellierung und Simulation größerer Logistiksysteme	Modellierung und Simulation oft zu aufwendig und langsam	Schnelle Modellierung und Simulation, bisher keine Anwendung für Logistiksysteme	Zu hohe Aggregation und Abstraktion der Modelle

## 3 Mesoskopischer Modellierungs- und Simulationsansatz

Dieses Kapitel beschreibt die Grundideen des mesoskopischen Simulationsansatzes. Die Idee der Entwicklung des mesoskopischen Simulationsansatzes liegt darin, durch die Nutzung von Elementen der existierenden Simulationskonzepte einen Ansatz zu entwickeln, der sowohl eine schnelle Modellerstellung und -berechnung ermöglicht, als auch für zahlreiche logistische Analyse- und Planungsaufgaben hinreichend genau ist.

- In Abschnitt 3.1 werden zuerst die Anforderungen an den zu entwickelnden Modellierungs- und Simulationsansatz und seine Grundideen beschrieben. Weiterhin wird in diesem Abschnitt auf die Potenziale des mesoskopischen Simulationsansatzes für die Aufwandsreduzierung bei Simulationsstudien eingegangen.
- Abschnitt 3.2 skizziert anschließend den typischen Anwendungsbereich des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes.

### 3.1 Grundideen des mesoskopischen Ansatzes

Die Anforderungen an den zu entwickelnden mesoskopischen Simulationsansatz ergeben sich aus den im vorherigen Kapitel beschriebenen Nachteilen der existierenden Simulationskonzepte.

Die erste wesentliche Anforderung an den mesoskopischen Simulationsansatz ist die Aufwandsreduzierung für eine Simulationsstudie im Vergleich zur ereignisdiskreten Simulation. Sowohl der Aufwand für die Vorbereitung (Datenermittlung und -aufbereitung, Modellerstellung) als auch für die Durchführung (Simulation) einer Simulationsstudie soll reduziert werden. Für die Anwendung mesoskopischer Modelle während der Betriebsphase logistischer Systeme stehen dabei insbesondere eine schnelle Simulation und Modellanpassung im Fokus der Betrachtung.

Die zweite wesentliche Anforderung an mesoskopische Modelle ist, dass sie für die Abbildung logistischer Flussprozesse und deren Steuerung eine höhere Genauigkeit als flussbasierte Modelle ermöglichen, um die Eignung des mesoskopischen Ansatzes für logistische Problemstellungen zu gewährleisten.

Die dritte wesentliche Anforderung, die der mesoskopische Modellierungs- und Simulationsansatz erfüllen muss, ist eine einfache und intuitive Modellierung und Simulation. Die Einfachheit der Bedienung sowohl in der Phase der Modellerstellung als auch in der Durchführungs- und Auswertungsphase ist eine der grundsätzlichen Anforderungen aus Untersuchungen zum Einsatz von Simulationssoftware [Feldmann u. Reinhart 2000, S. 280]. Auch [Straßburger et al. 2006, S. 396] stellen in einer Onlinebefragung fest, dass eine einfache Modellbildung ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl von Simulationswerkzeugen ist.

Zuerst soll die Frage beantwortet werden, wie eine schnellere Modellberechnung (Simulation) als mit ereignisdiskreten Modellen erreicht werden kann. Der hohe Rechenaufwand in ereignisdiskreten Modellen wird durch die Verfolgung einzelner logistischer Flussobjekte und den damit verbundenen Ereignissen verursacht. Eine schnellere Simulation ist möglich, wenn auf die Abbildung einzelner logistischer Flussobjekte verzichtet werden kann und der Objektfluss mit Flussraten (Menge/Zeiteinheit) abgebildet wird, wie das in flussbasierten Modellen erfolgt. Damit verbundene Genauigkeitseinbußen müssen für die Lösung von logistischen Problemstellungen akzeptabel sein. Die bisher existierenden flussbasierten Simulationsansätze sind aufgrund ihrer unzureichenden Abbildungsgenauigkeit in vielen Fällen nicht für eine hinreichend genaue Modellierung logistischer Flusssysteme geeignet (siehe Abschnitte 2.2.3 und 2.2.5).

Daraus lässt sich schließen, dass ein Ansatz, der die oben genannten Anforderungen erfüllt, bezüglich der Abbildungsgenauigkeit auf einer mesoskopischen Aggregationsebene zwischen mikroskopischen ereignisdiskreten Modellen auf Objektebene und makroskopischen flussorientierten Einproduktmodellen liegen muss. Deswegen sollen zunächst die drei Aggregationsebenen mikro, meso und makro bei der Abbildung logistischer Flusssysteme und die für diese Ebenen typischerweise genutzten Simulationsparadigmen betrachtet werden (siehe Abbildung 2.10 in Abschnitt 2.2). Das Wort *meso* stammt aus dem griechischen und bedeutet: „mittel, mitten“ [Duden 2006]. Somit ordnen sich mesoskopische Simulationsmodelle auf einer mittleren Abstraktions- und Aggregationsebene zwischen mikroskopischen und makroskopischen Simulationsmodellen ein.

Die makroskopische Ebene ist durch eine hohe Abstraktion und Aggregation und geringe Details gekennzeichnet. Es werden vorrangig strategische Fragestellungen betrachtet. Auf der makroskopischen Ebene finden kontinuierliche System-Dynamics-Modelle Anwendung.

Die mesoskopische Ebene ist durch eine mittlere Abstraktion und Aggregation und mittlere Details gekennzeichnet. Es werden typischerweise taktische Fragestellungen betrachtet. Hauptsächlich finden im Bereich der Logistik auf dieser Ebene ereignisdiskrete Modelle Anwendung, da kontinuierliche flussbasierte Modelle zu ungenau für diese Aggregationsebene sind und die ereignisdiskrete Simulation den meisten Logistikern vertrauter ist. Ein weiterer Grund ist, dass der ereignisdiskrete objektbasierte Ansatz gedanklich

am nächsten liegt, wenn es um die Abbildung von diskreten Stückgutflüssen in Logistiksystemen geht. Kontinuierliche System-Dynamics-Modelle finden auf der mesoskopischen Ebene so gut wie keine Anwendung. Das liegt darin begründet, dass eine einmal erfolgte Aggregation in diesen Modellen bei der Auswertung der Ergebnisse nicht mehr rückgängig gemacht werden kann. Die Modelle liefern deshalb zu aggregierte Ergebnisse, um sie für logistische Aufgabenstellungen auf der mesoskopischen Ebene einsetzen zu können (siehe Abbildung 3.1).

Die mikroskopische Ebene ist durch eine geringe Abstraktion und Aggregation und einen hohen Detaillierungsgrad gekennzeichnet. Es werden typischerweise operative Fragestellungen betrachtet. Auf dieser Ebene finden hauptsächlich ereignisdiskrete Modelle Anwendung.

Bei einer genaueren Betrachtung fällt auf, dass bei zahlreichen logistischen Aufgabenstellungen (z. B. Dimensionierungen, Kapazitätsplanungen, Durchsatzberechnungen, Grobplanungen) eine aggregierte mesoskopische Sicht vorhanden ist, jedoch wird der Begriff mesoskopisch nicht explizit genutzt. Oft sind sowohl die Daten zu den Leistungsanforderungen (Systemlast) und den Ressourcen (System) als auch die gewünschten Leistungsergebnisse in einer aggregierten Form (Menge/Zeiteinheit) gegeben, die einer mesoskopischen Sicht entspricht (siehe Abbildung 3.1) [Schenk et al. 2008b, S. 265], [Schenk et al. 2008a, S. 37], [Reggelin u. Tolujew 2008a, S. 80], (vgl. auch [Krahl 2009, S. 333 ff.]). Ein Grund dafür ist, dass in der Planungsphase oft keine genaueren Daten (z. B. für zukünftig zu erwartende Systemlasten) vorhanden sind beziehungsweise eine mesoskopische Aggregationsstufe bei groben Planungen und Analysen ausreichend ist.

Es soll nun näher betrachtet werden, wie mesoskopische Aufgabenstellungen mit ereignisdiskreten Simulationsansätzen bearbeitet werden.

Abbildung 3.1 zeigt die Vorgehensweise bei der Nutzung mikroskopischer ereignisdiskreter Simulationsmodelle für mesoskopische Aufgabenstellungen. Zuerst werden vorhandene Planungsdaten durch eine Dekomposition in einer detaillierteren Form dargestellt, als sie tatsächlich vorliegen. An den Quellen werden zum Beispiel diskrete Objektflüsse mit stochastischen Zwischenankunftszeiten generiert. Damit unterscheiden sich die Ausgangsdaten eines ausführbaren Simulationsmodells wesentlich von den ursprünglichen Planungsdaten und täuschen eine nicht vorhandene Genauigkeit vor. Die in mikroskopischen Modellen auf zufällige Weise generierten Objekte gibt es in dieser Art und Weise in der Realität nicht.

Die Objekte bewegen sich durch die Ressourcen des Systems. Die Abbildung des Leistungserfüllungsprozesses in der mikroskopischen Simulation erfolgt durch die Modellierung einzelner Operationen der Flussobjekte an den Ressourcenobjekten. Jede Operation wird durch ihren Start- und Endzeitpunkt gekennzeichnet. Diese Zeitpunkte stellen Ereignisse dar. Die Interpretation eines Ereignisses dient der Planung zukünftiger Ereignisse und der Erfassung und Auswertung statistischer Daten zum Prozessablauf.

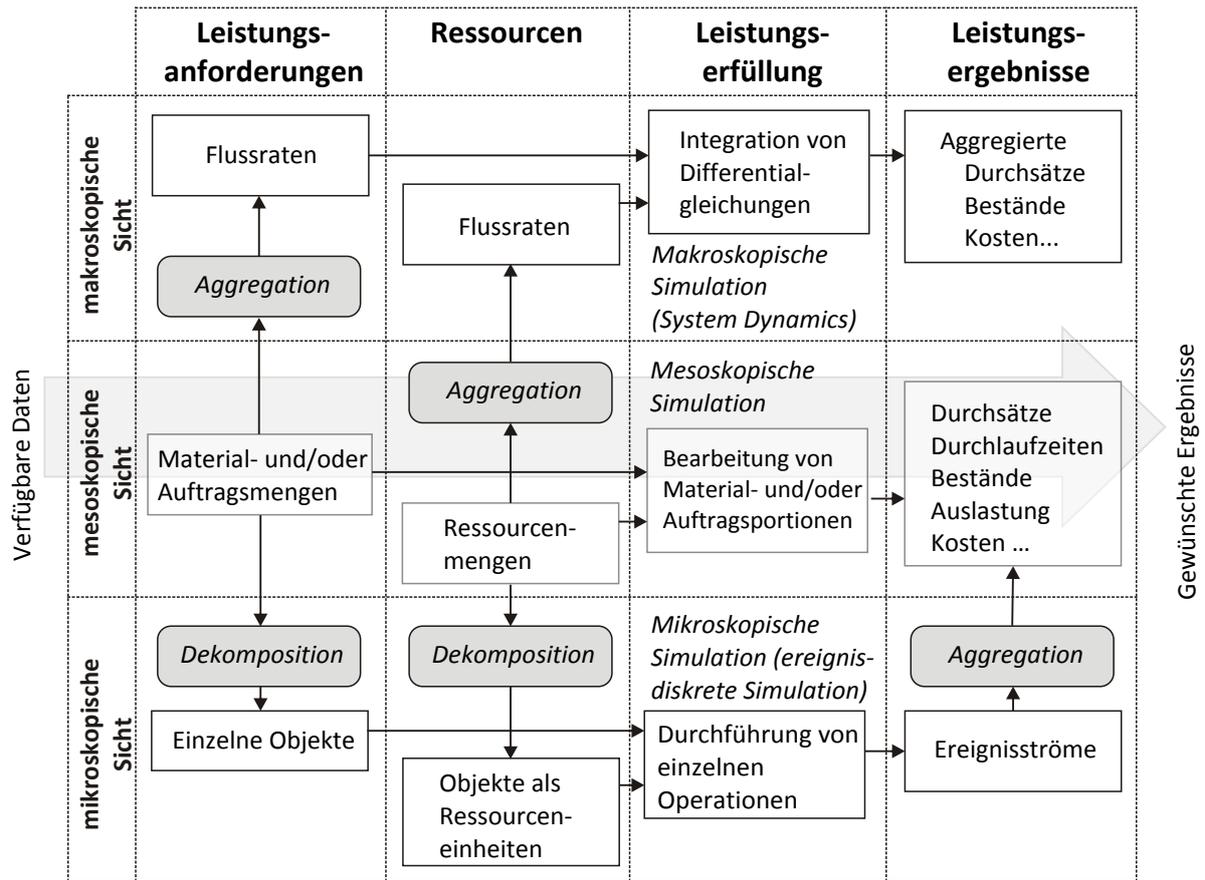


Abbildung 3.1: Mikro-, makro- und mesoskopische Sicht bei der Simulation

Die von mikroskopischen Simulationsmodellen aufwendig berechneten Lebensläufe der einzelnen logistischen Flussobjekte sind für den Modellnutzer oft nicht von Interesse. Es werden aggregierte Kennzahlen auf einer mesoskopischen Ebene erwartet. Somit erfolgt nach der Simulation auf Basis der Ereignisströme wieder eine Aggregation der Daten, um zu den gewünschten Ergebnissen zu kommen. Zur Berechnung von Mittelwerten und Konfidenzintervallen sowie zur Einschätzung von Wahrscheinlichkeiten und Verteilungsfunktionen werden statistische Verfahren angewendet, die nur dann stabile und interpretierbare Ergebnisse liefern, wenn die relevanten Ereignisse des modellierten Prozesses oft genug erfasst werden. Der Preis für die Einführung detaillierter Parameter in das Modell, die anhand von Verteilungsfunktionen beschrieben werden, ist sehr hoch. Zahlreiche Simulationsläufe werden notwendig.

Der bei Nutzung mikroskopischer Modelle für mesoskopische Aufgabenstellungen beschriebene Umweg mit Dekomposition und anschließend erneuter Aggregation der Daten ist kompliziert, aufwendig und fehleranfällig. Der Grundgedanke des mesoskopischen Simulationsansatzes ist deshalb die direkte Umwandlung von mesoskopischen Eingangsdaten in mesoskopische Ergebnisdaten. Mesoskopische Modelle arbeiten demnach mit Objektmengen, die durch ein Modell fließen, anstatt mit einzelnen Flussobjekten. Da die

Daten auf einer mesoskopischen Ebene in der Dimension Menge/Zeiteinheit vorliegen, bietet sich eine flussbasierte Vorgehensweise für diese direkte Umwandlung an.

Als nächstes muss die Frage beantwortet werden, welcher flussbasierte Simulationsmechanismus als Grundlage für die direkte Umwandlung von mesoskopischen Ausgangsdaten in Ergebnisdaten geeignet ist.

Bevor diese Frage beantwortet wird, soll noch angemerkt werden, dass eine Modellierung und Simulation mit aggregierten Daten grundsätzlich auch in objektbasierten ereignisdiskreten Modellen denkbar ist. Dieses Vorgehen führt jedoch zu Ungenauigkeiten und Problemen bei der Abbildung von Steuerungen [Sturrock u. Drake 1996] und wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter als Ansatz für eine mesoskopische Modellierung und Simulation verfolgt.

Für eine auf Flussraten basierende Simulation sind sowohl der kontinuierliche Simulationsansatz als auch der Discrete-Rate-Simulationsansatz geeignet. Da der Ansatz der Discrete-Rate-Simulation gegenüber dem kontinuierlichen Ansatz in Bezug auf Abbildungsgenauigkeit und Simulationsgeschwindigkeit Vorteile hat (siehe Abschnitt 2.2.5), ist er als Grundlage für die Entwicklung eines mesoskopischen Simulationsansatzes besser geeignet.

Nachfolgend werden noch einmal die Vorteile der Verwendung des Discrete-Rate-Ansatzes als Grundlage für einen mesoskopischen Simulationsansatz zusammengefasst:

- Die Modellierung mit Flussraten
  - erlaubt eine schnellere Simulation als mit ereignisdiskreten objektbasierten Simulationsmodellen und
  - ermöglicht eine Abbildung logistischer Prozesse auf einer mesoskopischen Aggregationsebene (Menge/Zeiteinheit).
- Die Ereignisplanung, die auf einer Modellierung mit stückweise konstanten Flussraten und der daraus resultierenden linearen Zustandsentwicklung basiert,
  - ermöglicht eine genauere und effizientere Modellberechnung im Vergleich zu kontinuierlichen Simulationsmodellen und
  - eine exakte Abbildung von Steuerungen, da die Zeitpunkte, zu denen vordefinierte Zustände eintreten, exakt berechnet werden können.

In der Literatur lassen sich bisher noch keine Anwendungen der Discrete-Rate-Simulation für Logistiksysteme finden, was mehrere Gründe hat. Die Discrete-Rate-Simulation ist aus einem anderen Anwendungsgebiet heraus entstanden (vorrangig physische Flussprozesse wie zum Beispiel in der Lebensmittelindustrie und Hochgeschwindigkeitsprozesse wie z. B. Verpackungsprozesse). Es gibt insgesamt relativ wenig Veröffentlichungen zur Discrete-Rate-Simulation. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass

der Ansatz den meisten Logistikern nicht bekannt ist. Ein weiterer Grund sind die für logistische Prozesse noch zu hohe Aggregation (Einproduktmodelle) und die abstrakten Modellelemente (Tanks und Ventile).

Das Ziel ist deshalb, die Prinzipien der Discrete-Rate-Simulation so zu erweitern, dass die am Anfang des Abschnitts genannten Anforderungen an den mesoskopischen Ansatz (schneller als ereignisdiskrete Simulation, genauer als flussbasierte Simulation, einfache und intuitive Anwendung durch Logistiker) erfüllt werden. Der Ansatz der Discrete-Rate-Simulation soll deshalb in Bezug auf folgende Punkte erweitert werden:

- **Prozessmodell**

Typisch für die Produktion und Logistik ist das Auftreten gebündelter Materialflüsse, wie sie zum Beispiel bei Transporten oder bei der Bildung von Produktionslosen entstehen. Treten diese gebündelten Materialflüsse mit zeitlich großen Abständen auf, kann eine flussbasierte Abbildung zu ungenau sein. Deshalb soll der mesoskopische Ansatz zusätzlich zur Abbildung des zeitlichen und räumlichen Verhaltens logistischer Flussobjekte durch einen Fluss mit stückweise konstanter Flussrate auch die Möglichkeit bieten, impulsförmige Flüsse wie in der ereignisdiskreten Simulation abzubilden. Damit kann bei Bedarf die Genauigkeit des Modells erhöht werden.

Anstatt einer Modellierung mit zeitlosen Ereignissen für einen gebündelten Materialfluss wäre im Prinzip auch eine Modellierung mit einer sehr hohen Flussrate über einen kurzen Zeitraum möglich. Die Abbildung mit zeitlosen Ereignissen erlaubt jedoch eine direkte Abbildung und soll deswegen im mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatz möglich sein. Ein Modell mit vorwiegend aus Impulsen bestehenden Flüssen ist jedoch nicht Ziel des mesoskopischen Ansatzes, da sich die Modelle dann in Richtung ereignisdiskreter Modelle entwickeln und ihre Erstellung und Berechnung aufwendig wird. Auf das Prozessmodell der mesoskopischen Simulation wird in Abschnitt 4.3 detailliert eingegangen.

- **Produktmodell**

Bei der Discrete-Rate-Simulation wird der Fluss zwischen zwei Knoten eines Netzwerkes mit nur einer Variablen abgebildet. Dieses Vorgehen ist für viele logistische Aufgabenstellungen zu ungenau. Aus diesem Grund sollen Produkttypen und Produktportionen eingeführt werden (vgl. [Schenk et al. 2009b]).

Mesoskopische Modelle sollen in der Lage sein, zeitlich parallel im Modell durchgehend zwischen verschiedenen Produkttypen zu unterscheiden, um trotz einer flussbasierten Modellierung eine hohe Abbildungsgenauigkeit bezüglich logistischer Flussobjekte zu erreichen. Das bedeutet, dass der Fluss zwischen zwei Modellelementen nicht mehr nur mit einer Variablen dargestellt wird, sondern mit so vielen Variablen, wie es Produkttypen gibt.

Auf der nächsttieferen Hierarchieebene kann innerhalb eines Produkttyps noch einmal sequentiell in Produktportionen unterschieden werden. Dadurch kann zum Beispiel zwischen unterschiedlichen Produktionslosen, Aufträgen und Chargen, die im gesamten Modell verfolgt werden sollen, unterschieden werden.

Auf das Produktmodell der mesoskopischen Simulation wird in Abschnitt 4.4 näher eingegangen.

- **Modellelemente**

Die mesoskopischen Modellelemente sollen eine für den Logistiker einfache und intuitive Modellierung ermöglichen. Deswegen soll auf die für die flussbasierten Ansätze typischen abstrakten Modellelemente Behälter bzw. Tank und Ventile verzichtet werden. Anstelle eines Behälters und Ventils wird ein Trichter als Modellelement eingefügt, da die Trichteranalogie im Bereich Produktion und Logistik unter anderem durch die Arbeiten von [Bechte 1984] und [Wiendahl 1997] allgemein bekannt ist. Auf die mesoskopischen Modellelemente wird in Abschnitt 4.6 detailliert eingegangen.

- **Abbildung von Steuerungen**

In mesoskopischen Modellen soll eine Abbildung beliebiger nutzerdefinierter Steuerungsstrategien möglich sein. Der Nutzer muss beliebige Bedingungen und mit dem Eintreten der Bedingungen verbundene Aktionen definieren können.

- **Simulationssoftware**

Da keine Simulationssoftware existiert, die eine einfache und direkte Erstellung mesoskopischer Simulationsmodelle ermöglicht, muss ein spezieller mesoskopischer Simulator entwickelt werden. Auf den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten mesoskopischen Simulator wird in Abschnitt 5.1 eingegangen.

Tabelle 3.1 fasst noch einmal die wichtigsten Merkmale des mesoskopischen Simulationsansatzes im Vergleich zu ereignisdiskreten, Discrete-Rate- und kontinuierlichen System-Dynamics-Modellen zusammen.

### **Potenzial der Aufwandsreduzierung durch den mesoskopischen Ansatz**

Das mit der Entwicklung des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes verfolgte Hauptziel ist die Aufwandsreduzierung für eine Simulationsstudie im Vergleich zu mikroskopischen ereignisdiskreten Modellen. Nachfolgend soll für die einzelnen Phasen einer Simulationsstudie aufgezeigt werden, wie der mesoskopische Ansatz dieses Ziel erreicht.

Nach [Reinhart u. Feldmann 1997, S. 22] verteilt sich der Aufwand in einem Simulationsprojekt in etwa wie folgt:

- Pflichtenheft: 15 %,

Tabelle 3.1: Mesoskopischer Modellierungs- und Simulationsansatz im Vergleich

	<b>Ereignisdiskrete Simulation</b>	<b>Mesoskopische Simulation</b>	<b>Discrete-Rate-Simulation</b>	<b>System Dynamics</b>
Anwendung	Logistikprozesse auf Objektebene	Logistikprozesse auf einer aggregierten mesoskopischen Ebene	Lineare kontinuierliche Prozesse	Aggregierte Logistikprozesse (Einproduktmodelle)
Software-Tools (Auswahl)	Plant Simulation, AutoMod	MesoSim	ExtendSim, Arena	Vensim, Powersim
Genauigkeit	Hoch	Mittel	Gering – Mittel	Gering
Aufwand	Hoch	Mittel	Gering – Mittel	Gering
Abbildung logistischer Flussprozesse	Einzelne Objekte (Forderungen), die durch ein System von Ressourcen (Bedienstationen) fließen	Mengen von Gütern, die durch das Modell fließen sowohl als Fluss als auch als zeitlose Menge (Impuls)	Ratenbasiertes Flusssystem; homogene Massengutströme, die durch das Modell fließen	Werte, die durch das Modell fließen; Bestände und Flüsse („stock-and-flow“-Darstellung), Feedbacks
Produktmodell	Einzelne Flussobjekte	Produkttypen innerhalb eines Flusses, Produktportionen innerhalb eines Produkttyps unterscheidbar	Eine Variable für den Fluss zwischen zwei Knoten des Netzwerkes, einzelne Flussobjekte nicht unterscheidbar	Eine Variable für den Fluss zwischen zwei Knoten des Netzwerkes, einzelne Flussobjekte nicht unterscheidbar
Hauptmodell-elemente (Systemstruktur)	Logistikspezifische Ressourcen, Warteschlangen	Mehrkanalige Trichter, mehrkanalige Verzögerungselemente	Tanks, Ventile, Förderstrecken	Behälter und Ventile
Zustandsänderungen durch	Ereignisse bezüglich Orts- und Zustandsänderungen der Objekte	Ereignisse bezüglich Änderungen der Flussraten und des Auftretens von Impulsen	Ereignisse bezüglich Änderungen der Flussraten	Voranschreiten der Simulationszeit
Zeitschritt	Variabel	Variabel	Variabel	Konstant

- Modellierung: 27 %,
- Datenakquisition: 22 %,
- Datenbereinigung: 10 %,
- Experiment: 16 %,
- Ergebnisinterpretation: 10 %.

Den drei Hauptphasen einer Simulationsstudie nach [VDI3633 2000, S. 11] (siehe Abbildung 2.6) zugeordnet, ergibt sich danach folgender Aufwand:

- Vorbereitung: 74 %,
- Durchführung: 16 %,
- Auswertung: 10 %.

Auch wenn diese Zahlen mit Vorsicht zu genießen sind, da sie von Simulationsstudie zu Simulationsstudie schwanken, lässt sich doch ableiten, dass ein Großteil des Aufwandes während der Vorbereitungsphase entsteht. Das deckt sich mit anderen Aussagen:

- Datenerfassung und -vorbereitung benötigt oft viel Zeit [Kosturiak u. Gregor 1995, S. 70].
- Datenbeschaffung und -bereitstellung umfassen 30-50 % des Aufwandes einer Simulationsstudie [Csanady et al. 2008, S. 595].

Wenn das Ziel heißt, den Aufwand einer Simulationsstudie zu reduzieren, lassen sich demnach große Effekte in der Phase der Vorbereitung erzielen. Es muss angemerkt werden, dass diese Zahlen hauptsächlich aus Simulationsanwendungen in der Planung stammen, wo Simulationsmodelle oft nur einmalig angewendet werden. Bei Simulationsanwendungen in der Betriebsphase ist jedoch davon auszugehen, dass die Simulationsmodelle wiederholt genutzt werden, so dass hier nicht nur der Aufwand für die Vorbereitung großes Potenzial bietet, sondern vor allem eine Aufwandsreduzierung bei der Durchführung und Auswertung der Experimente. Je schneller die Simulationsexperimente durchgeführt und ausgewertet werden können, umso mehr Einsatzmöglichkeiten ergeben sich im Echtzeitbetrieb beziehungsweise im echtzeitnahen Betrieb.

Durch den mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatz lässt sich in allen drei Hauptphasen einer Simulationsstudie eine Aufwandsreduzierung erreichen:

- **Vorbereitung**

Da der mesoskopische Modellierungs- und Simulationsansatz mit aggregierten Daten arbeitet, kann der Aufwand für die Datenbeschaffung und -aufbereitung reduziert

werden, da keine Daten für einzelne Flussobjekte vorliegen beziehungsweise aufbereitet werden müssen. Nach [Feldmann u. Reinhart 2000, S.254] liegt der große Aufwand für die Vorbereitung einer Simulationsstudie unter anderem in Schwierigkeiten bei der Datenbeschaffung und in der mangelnden Qualität der verfügbaren Daten. Diese beiden Probleme können mit dem mesoskopischen Ansatz reduziert werden.

- **Durchführung**

Bei der Durchführung der Simulationsexperimente kann der Aufwand in mesoskopischen Modellen im Vergleich zu ereignisdiskreten Modellen reduziert werden, da keine einzelnen Flussobjekte betrachtet werden, sondern der Objektfluss mit stückweise konstanten Flussraten abgebildet wird. Dadurch wird der Rechenaufwand drastisch reduziert.

- **Auswertung**

Auch in der Auswertung kommt es in den meisten Fällen zu einer Aufwandsreduzierung durch den mesoskopischen Simulationsansatz. Da mesoskopische Modelle logistische Objektflüsse mit stückweise konstanten Flussraten approximieren, ist im Gegensatz zu ereignisdiskreten Modellen im Idealfall nur ein Simulationslauf notwendig und die Ergebnisse liegen bereits in der gewünschten Form vor.

### **Bisherige Verwendung des Begriffes mesoskopische Simulation in der Logistik**

Zum Abschluss dieses Abschnittes soll noch kurz auf den Begriff mesoskopisch im Zusammenhang mit seiner Verwendung im Bereich der Simulation von Logistiksystemen eingegangen werden, wobei jedoch kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird.

Der Begriff mesoskopische Simulation wurde in der Logistik zuerst im Bereich der Verkehrssimulation verwendet, wo oft eine beliebige Mischung aus makroskopischer und mikroskopischer Simulation als mesoskopisch bezeichnet wird. Im Bereich Verkehr wird der Begriff mesoskopisch wesentlich häufiger genutzt als bei der Simulation im Umfeld von Produktion und Logistik.

[Hoyer 1999] betrachtet mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Verkehrsmodelle für ein Straßennetz einer Großstadt. [Wittmann 1999] schlägt einen mesoskopischen Ansatz zur Verkehrsflussmodellierung vor, der den Zielkonflikt zwischen kurzen Rechenzeiten und einer hohen Detailgenauigkeit lösen soll. [Brannolte 1999] gibt einen Überblick über Simulationsmodelle im Verkehrswesen und geht dabei auf makroskopische, mesoskopische, mikroskopische und submikroskopische Modelle ein. [Florian et al. 2001] beschreiben ein hybrides mesoskopisches Simulationsmodell zur Optimierung der dynamischen Verkehrssteuerung. [Burghout 2005] beschreibt verschiedene mesoskopische Verkehrsmodelle für die Online-Prognose und gibt einen vergleichenden Überblick zu mikroskopischen, mesoskopischen und makroskopischen Verkehrssimulationsmodellen.

In Bezug auf Supply Chains wurde der Begriff mesoskopische Simulation durch [Marthaler et al. 2003] genutzt, wobei hier mit diesem Begriff keine qualitativ neue Modellklasse bezeichnet wird, sondern auf Differentialgleichungen basierende Modelle. Ein Konzept zum mesoskopischen Ansatz bei der Modellierung und Simulation von Personenströmen wurde in [Hanisch et al. 2003] und [Tolujew u. Alcala 2004] beschrieben. Die Grundidee besteht dabei darin, dass auf die Verfolgung von einzelnen Objekten verzichtet wird und mit Objektmengen operiert wird. Dieses Prinzip liegt auch dem im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen mesoskopischen Simulationsansatz zugrunde.

## 3.2 Anwendungsbereich des mesoskopischen Ansatzes

Der mesoskopische Ansatz ordnet sich zwischen mikroskopischen ereignisdiskreten Modellen und makroskopischen System-Dynamics-Modellen ein (siehe Abbildung 3.2). Er soll typischerweise da zur Anwendung kommen, wo ereignisdiskrete Modelle zu aufwendig sind und kontinuierliche Modelle zu abstrakt sind. Der mesoskopische Ansatz dient der schnellen Lösung von mesoskopischen Analyse- und Planungsaufgaben in logistischen Flusssystemen.

Mesoskopische Aufgabenstellungen sind dadurch charakterisiert, dass sowohl Angaben zum System (Ressourcen mit ihren Kapazitäten) als auch Angaben zur Systemlast nur auf einer mittleren aggregierten Ebene vorliegen und auch die geforderten Analyseergebnisse auf einer mesoskopischen Ebene ausreichend sind. Grundsätzlich ist die mesoskopische Simulation für alle in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Aufgabenstellungen anwendbar, wenn keine einzelnen Objekte betrachtet werden müssen und eine Beschreibung von diskreten Objektflüssen mit stückweise konstanten Flüssen akzeptabel ist. Die flussbasierte Abbildung logistischer Objektflüsse schließt somit Aufgabenstellungen aus, bei denen die Betrachtung einzelner logistischer Flussobjekte von Bedeutung ist, wie zum Beispiel bei Reihenfolgeplanungen. Untersuchungen, wann eine Annäherung von diskreten Objektflüssen mit stückweise konstanten Flüssen akzeptabel ist, finden sich bei [Kouikoglou u. Phillis 2001].

Der Anwendungsbereich des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes wird nachfolgend nach folgenden drei Kriterien beschrieben:

- Planungsebene und -horizont
- Merkmale des logistischen Flusssystems
- Art der Aufgabenstellung.

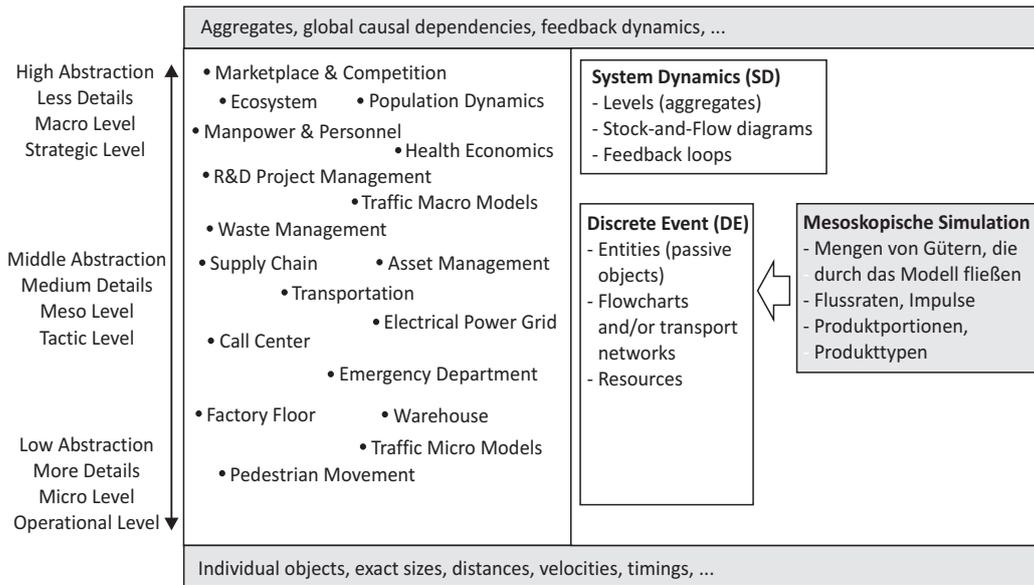


Abbildung 3.2: Einordnung des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes in die Übersicht von [Borshchev u. Filippov 2004, S. 2 ff.]

### Planungsebene und -horizont

Eine häufig in der Literatur zu findende Einteilung von Planungsaufgaben nach Planungsebenen und -zeithorizonten ist die Einteilung in langfristige strategische Planung mit einem Planungshorizont von drei Jahren und mehr, mittelfristige taktische Planung mit einem Planungshorizont von Monaten und Jahren und kurzfristige operative Planung mit einer Wirkungsdauer von Tagen und Wochen [Schenk u. Wirth 2004, S. 235], [Krampe et al. 2006, S. 59], [Hartberger 1991, S. 35], [Gottschalk 1989, S. 111].

Die Zeithorizonte der Planung nach [Kuhn u. Hellingrath 2002, S. 6] sind in Abbildung 3.3 dargestellt. [Fleischmann et al. 2002, S. 77] unterscheiden in ihrer Supply-Chain-Planning-Matrix (siehe Abbildung 3.4) ebenfalls zwischen einem kurzfristigen, mittelfristigen und langfristigen Planungshorizont und ordnen den Ebenen typische Planungsaufgaben zu.

Wie bereits dargestellt wurde, ist die mesoskopische Simulation insbesondere geeignet, wenn es um die Abbildung von Logistikprozessen auf einer aggregierten Ebene geht und sich diese Prozesse hinreichend genau durch einen stückweise konstanten Fluss darstellen lassen und nicht die Abbildung einzelner Objekte im Vordergrund steht, sondern eine aggregierte Betrachtung ausreichend ist. Das ist typischerweise der Fall, wenn es sich um Planungsaufgaben auf der mittelfristigen, taktischen Ebene handelt. Die mesoskopische Simulation kann jedoch auch in der kurzfristigen, operativen Planung eingesetzt werden, wenn die abzubildenden logistischen Flussprozesse durch Flussgrößen mit stückweise konstanten Flussraten abgebildet werden können und eine Unterscheidung einzelner Objekte

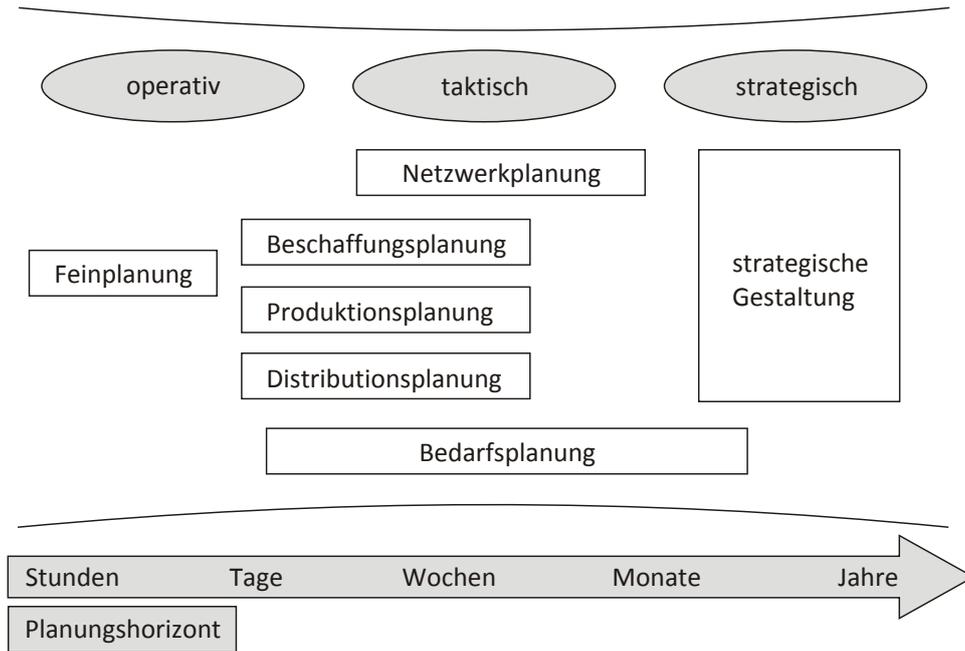


Abbildung 3.3: Zeithorizonte der Planung [Kuhn u. Hellgrath 2002, S. 6]

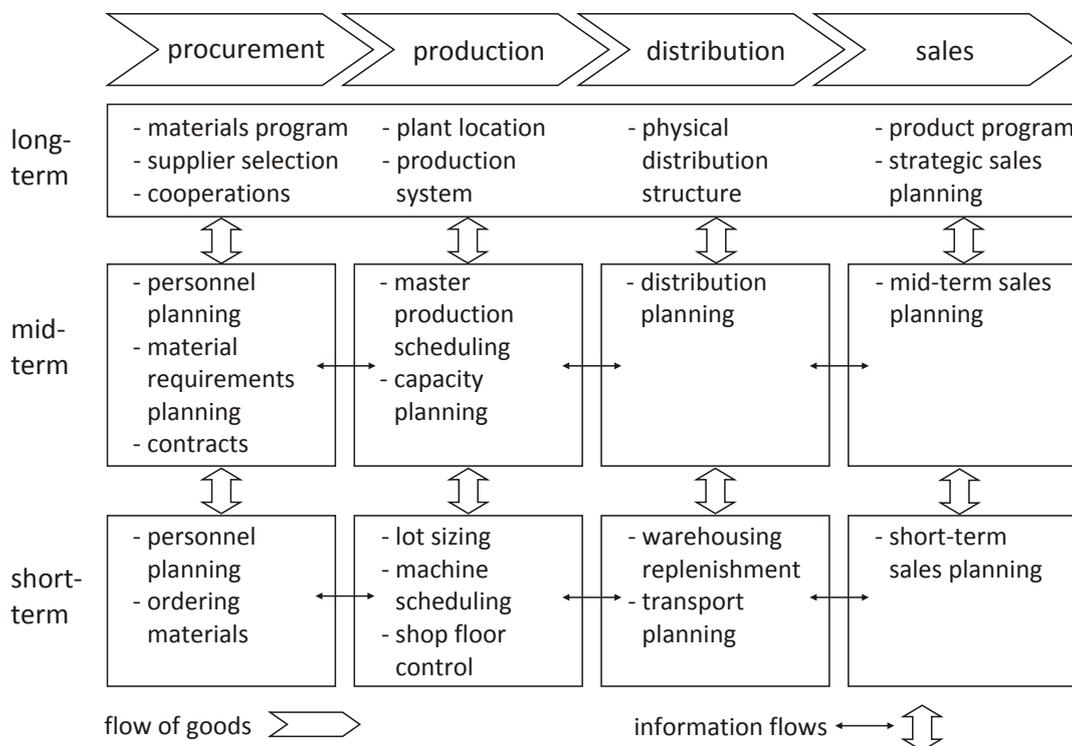


Abbildung 3.4: Supply-Chain-Planning-Matrix [Fleischmann et al. 2002, S. 77]

<b>Erzeugnis- spektrum</b>	Erzeugnisse nach Kunden- spezifikation	Typisierte Erzeug- nisse mit kunden- spezif. Varianten	Standard- erzeugnisse mit Varianten	Standard- erzeugnisse ohne Varianten
<b>Fertigungs- art</b>	Einmal- fertigung	Einzel- und Kleinserien- fertigung	Serien- fertigung	Massen- fertigung
<b>Fertigungs- ablaufart</b>	Baustellen- fertigung	Werkstatt- fertigung	Gruppen- und Linienfertigung	Fließ- fertigung

Abbildung 3.5: Erzeugnisspektrum, Fertigungsart und Fertigungsablaufart als Merkmale eines logistischen Flusssystems (in Anlehnung an [Schomburg 1980, S. 88])

für die Analyse- und Planungsaufgaben nicht notwendig ist. Es ist auch möglich, Aufgaben der Netzwerkgestaltung auf der strategischen Ebene mit dem mesoskopischen Ansatz zu unterstützen.

### **Merkmale des logistischen Flusssystems**

Es gibt eine Reihe von typologischen Grundmustern für Produktions- und Logistiksysteme, die oft auf der Arbeit von [Schomburg 1980] beruhen. Nachfolgend sollen nur die für die Einordnung der mesoskopischen Simulation relevanten Merkmale mit ihren Ausprägungen betrachtet werden. Drei wesentliche Merkmale für die Einordnung sind das Erzeugnisspektrum, die Fertigungsart und die Fertigungsablaufart (siehe Abbildung 3.5). Bei [Lödding 2008, S. 94 ff.] wird die Fertigungsablaufart als Fertigungsprinzip bezeichnet.

Wie bereits erwähnt wurde, eignen sich mesoskopische Simulationsmodelle gut für die Abbildung von logistischen Flüssen, die mit stückweise konstanten Flussraten hinreichend genau abgebildet werden können. Das trifft im Allgemeinen auf die Fertigungsarten Massenfertigung und Serienfertigung und auf die Fertigungsablaufarten Fließfertigung und Gruppen- und Linienfertigung zu. Bezüglich des Erzeugnisspektrums eignen sich mesoskopische Modelle besonders gut zur Abbildung von Produktions- und Logistikprozessen für Standarderzeugnisse ohne Varianten beziehungsweise mit einer geringen Anzahl von Varianten. Dazu soll noch angemerkt werden, dass generell der Einsatz von Ablaufsimulationen nach einer Studie von [Reinhart u. Feldmann 1997, S. 13] im Bereich der Massen- und Serienfertigung am verbreitetsten ist.

Ein weiteres Merkmal, das zur Einordnung herangezogen werden soll, ist die Komplexität des Materialflusses (siehe Abbildung 3.6). Der im Rahmen dieser Arbeit beschriebene Ansatz eignet sich besonders für die Abbildung von linearen Materialflüssen und komplexen Materialflüssen ohne Rückflüsse. Es lassen sich auch Rückflüsse in den mesoskopischen Modellen über die Modellsteuerung abbilden, was jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wird. Die Ausprägungen der Merkmale Erzeugnisspektrum, Fertigungs-

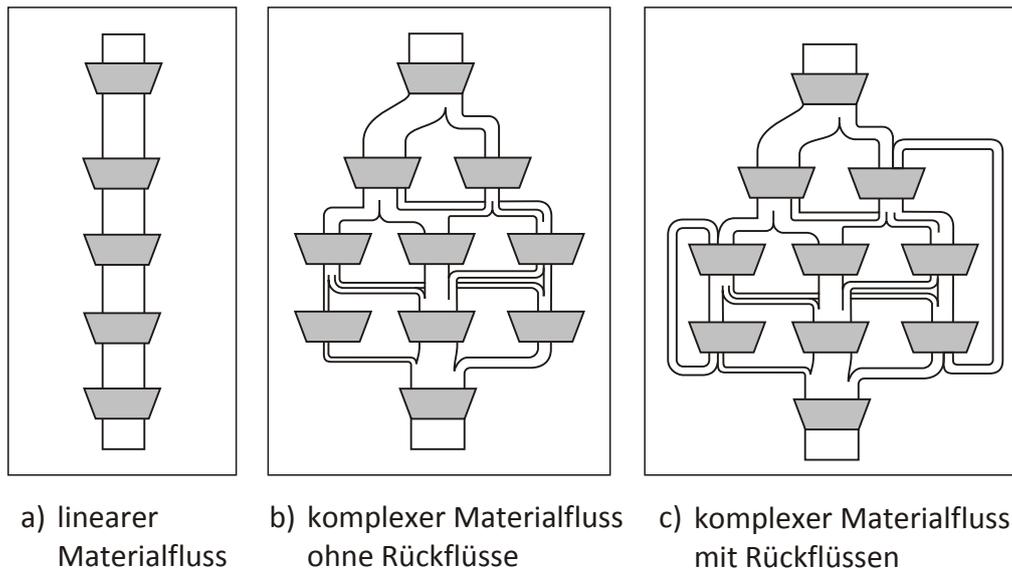


Abbildung 3.6: Formen der Materialflusskomplexität [Lödding 2008, S. 105]

art und Fertigungsablaufart, die besonders geeignet für den mesoskopischen Ansatz sind, führen in den meisten Fällen zu den hier betrachteten ersten beiden Materialflusstypen. Rückflüsse sind eher typisch für eine Werkstattfertigung. Dafür ist der mesoskopische Ansatz in den meisten Fällen jedoch nicht der bevorzugt anzuwendende Simulationsansatz. Ereignisdiskrete Modelle sind hier besser geeignet.

[Gudehus 2005, S. 568] unterteilt Logistiknetzwerke in:

- Intralog-Netze: innerbetriebliche Logistiknetzwerke innerhalb der einzelnen Betriebsstätten eines Unternehmens,
- Extralog-Netze: außerbetriebliche Logistiknetzwerke zwischen den Betriebsstätten der Unternehmen und
- Interlog-Netze: Logistiknetze aller Unternehmen und Wirtschaftsteilnehmer.

Eine ausführliche Übersicht zu logistischen Netzwerken findet sich bei [Bretzke 2008].

Nach [Arnold u. Furmans 2007, S. 6] „gelten im Prinzip die gleichen Strukturen vernetzter Fließprozesse“ für externe und innerbetriebliche Materialflusssysteme, was „die Anwendung der Verfahren für den innerbetrieblichen Materialfluss auch auf die externen Materialflusssysteme der Logistik“ erlaubt. Deshalb spielt für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten mesoskopischen Modellierungsansatz diese Unterscheidung keine Rolle. Er kann im gleichen Maße sowohl für innerbetriebliche Produktionslogistiksysteme als auch für unternehmensübergreifende Logistiknetzwerke angewendet werden.

Eine weitere Unterscheidung betrifft den Umfang des Planungsobjektes, d. h. ob die Planung für ein Logistiknetzwerk, ein Unternehmen, einen Betrieb oder eine Abteilung

erfolgt oder ob Gesamt- oder Teilprozesse geplant werden [Hartberger 1991, S. 35], [Gottschalk 1989, S. 111]. Der mesoskopische Ansatz ist grundsätzlich für alle Ebenen geeignet. Seine Vorteile spielt er bei der Anwendung für größere Systeme aus. Dort sind ereignisdiscrete Modelle sehr schnell mit einem hohen Aufwand verbunden. Mesoskopische Modelle erlauben hingegen eine schnelle Modellierung und Simulation.

### Art der Aufgabenstellung

Zum Schluss soll noch eine Einordnung der Aufgabenstellungen, die mit mesoskopischen Simulationsmodellen bearbeitet werden können, in Bezug auf bekannte und unbekannte Größen erfolgen. [Großeschallau 1984, S. 190] leitet in Abhängigkeit vom Bekanntsein von System und Systemlast vier verschiedene Aufgabenfelder der Simulationstechnik ab (siehe Tabelle 3.2). Diese vier Fälle lassen sich auch bei Anwendung des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes unterscheiden, wobei die ersten drei Fälle im Fokus der Anwendung stehen.

Tabelle 3.2: Aufgabenfeld der Simulationstechnik für die Untersuchung von Materialflusssystemen (in Anlehnung an [Großeschallau 1984, S. 190])

Fall	System	Systemlast	Simulationsergebnis
1	bekannt	bekannt	Funktionalität der Technik und der Systemorganisation
2	unbekannt (Variation der technischen Möglichkeiten)	bekannt	Ermittlung technischer und organisatorischer Alternativen (Fördertechnik, Lagertechnik, Streckenführung, Betriebsstrategien, Steuerungen)
3	bekannt	unbekannt (Variation der Randbedingungen)	Leistungsgrenzen
4	unbekannt (Parameter-Variation)	unbekannt (Parameter-Variation)	Allgemeingültige Aussagen über typische Systemstrukturen (Grundlagenforschung)

## 4 Grundprinzipien der mesoskopischen Modellierung und Simulation

Bei der Analyse und Planung von Produktions- und Logistiksystemen wird oft eine Unterteilung in Produkte, Prozesse und Systeme genutzt [Schenk et al. 2010a, S. 225], [Illés et al. 2007, S. 3]. Dieser Unterteilung folgend sollen die Grundprinzipien des mesoskopischen Simulationsansatzes in diesem Abschnitt beschrieben werden.

Prozesse sind zeitliche Folgen von Zustandsübergängen in einem System [Frank 1999, S. 52]. Deshalb ist die Art und Weise, wie die Zustandsentwicklung des modellierten Systems im Zeitverlauf abgebildet wird, ein wesentliches Kriterium für die Beschreibung des Prozessmodells eines Simulationsansatzes. Als Basis für die Betrachtung des Prozessmodells des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes werden in Abschnitt 4.1 zuerst die grundlegenden Prozesstypen in Flusssystemen abgeleitet. Aufbauend darauf werden in Abschnitt 4.2 die Darstellungsformen für Flussprozesse in der kontinuierlichen, ereignisdiskreten und Discrete-Rate-Simulation betrachtet, da der mesoskopische Simulationsansatz auf ihnen basiert. Im Anschluss daran wird in Abschnitt 4.3 auf das Prozessmodell des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes eingegangen.

Abschnitt 4.4 beschreibt das Produktmodell des mesoskopischen Ansatzes, ergänzend zu den bereits in Abschnitt 3.1 beschriebenen Grundlagen. Anschließend wird in Abschnitt 4.5 der mesoskopische Simulationsmechanismus beschrieben, bevor in Abschnitt 4.6 auf die mesoskopischen Modellelemente eingegangen wird. Die mesoskopischen Modellelemente bilden die Struktur des modellierten logistischen Flusssystems ab und steuern die logistischen Flussprozesse.

### 4.1 Klassifikation von Prozessen in Flusssystemen

Da die zu modellierenden Produktions- und Logistiksysteme als Flusssysteme betrachtet werden, sollen zuerst die grundlegenden Prozesstypen in Flusssystemen anhand der Analogie zu einem hydraulischen System abgeleitet werden, um eine Basis für die Darstellung der Prozessmodelle der existierenden Simulationsansätze und der Ableitung des Prozessmodells für den mesoskopischen Simulationsansatz zu schaffen. Die hydraulische Metapher ist im Umfeld der flussorientierten Sichtweise des System-Dynamics-Ansatzes verbreitet [Sterman 2000, S. 194], [Wagner 2004], [Scholz-Reiter et al. 2008, S. 113].

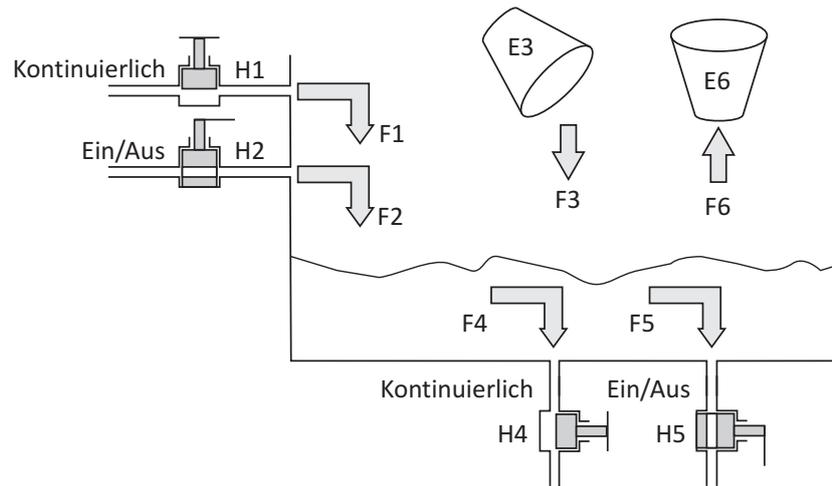


Abbildung 4.1: Hydraulisches System (E - Eimer, F - Fluss, H - Hahn)

Das betrachtete elementare hydraulische System besteht aus einem Behälter mit seinen Zu- und Abflüssen (siehe Abbildung 4.1). In diesem Flusssystem existieren zwei grundlegende Prozesstypen:

- Flussprozesse (Zu- und Abflüsse aus dem Behälter) und
- Bestandsentwicklungsprozess im Behälter,

weshalb man in einem Flusssystem auch von Fluss- und Bestandsgrößen spricht. Die Arbeit von [Wagner 2004] beschäftigt sich intensiv mit Bestands- und Flussgrößen innerhalb des Stock-Flow-Denkens des System-Dynamics-Ansatzes.

Für das hydraulische System in Abbildung 4.1 lassen sich die Intensitäten des Zuflusses F1 und des Abflusses F4 im Zeitverlauf kontinuierlich durch die Hähne H1 und H4 regeln. Die Hähne H2 und H5 für die Flüsse F2 und F5 können die Durchflussmenge ohne Zeitverzögerung sprunghaft verändern. Das entspricht einer sehr schnellen Betätigung der Hähne H1 und H4. Die Eimer E3 und E6 für die Flüsse F3 und F6 befüllen beziehungsweise entleeren den Behälter auf einmal mit einer bestimmten Menge Flüssigkeit. Mit Hilfe des beschriebenen hydraulischen Systems können drei Grundtypen von Flussprozessen abgeleitet werden, die der folgende Abschnitt näher betrachtet.

### 4.1.1 Flussprozessgrundtypen

#### Diskreter impulsförmiger Flussprozess

Abbildung 4.2a zeigt diskrete impulsförmige Flussprozesse, die durch Nutzung der Eimer E3 und E6 entstehen. Da die Flussprozesse F3 und F6 eine Folge von zeitlosen Ereignissen sind und nicht durch eine Dauer gekennzeichnet sind, wird für diese Prozesse die Größe

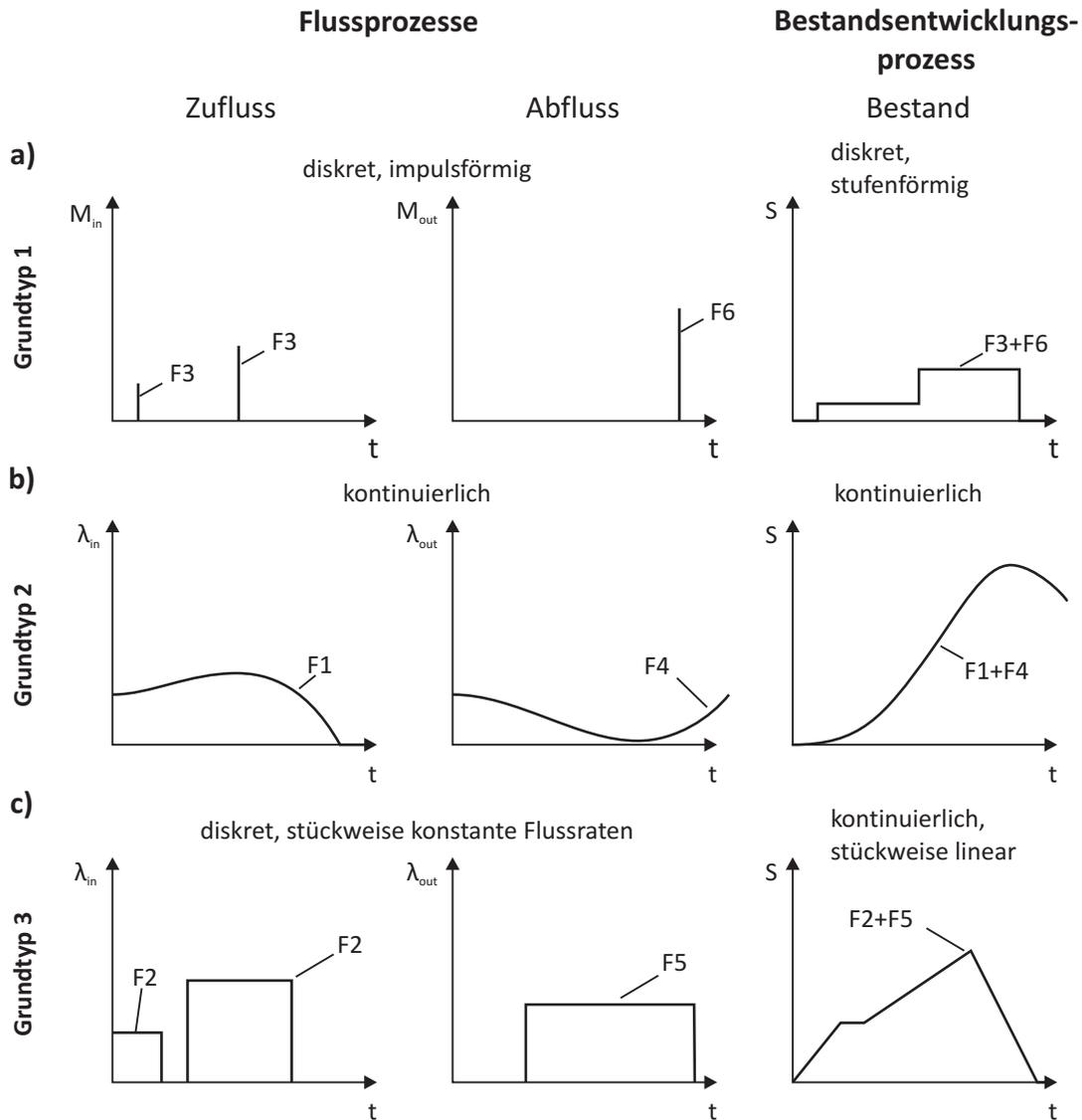


Abbildung 4.2: Flussprozessgrundtypen

$M$  eingeführt, die die Menge von Objekten, die zu einem Ereignis gehört, beschreibt. Der resultierende Bestandsentwicklungsprozess ist eine Stufenfunktion und wird durch die Bestandsgröße  $S$  beschrieben.

Sequenzen von zeitlosen Ereignissen, die Orts- und Zustandsänderungen logistischer Flussobjekte betreffen, sind typisch für die in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen ereignisdiskreten Simulationsmodelle in der Logistik.

### Kontinuierlicher Flussprozess

Abbildung 4.2b zeigt die kontinuierlichen Flussprozesse Zufluss  $F1$  und Abfluss  $F4$ , die durch Nutzung der Hähne  $H1$  und  $H4$  entstehen und durch die Flussrate  $\lambda$  beschrieben werden. Die Flussraten ändern sich kontinuierlich im Zeitverlauf. Die resultierende

Bestandsgröße  $S$  ändert sich ebenfalls kontinuierlich im Zeitverlauf.

Mit kontinuierlichen Flussmodellen lassen sich zum Beispiel physische Stoffströme abbilden, in denen keine einzelnen Objekte unterschieden werden. Eine weitere Anwendung ist die Abbildung von Material-, Informations- und Personenflüssen auf einer aggregierten Ebene für die strategische Planung, wie sie in makroskopischen System-Dynamics-Modellen Anwendung findet. Kontinuierliche Fluss- und Bestandsgrößen sind typisch für die in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen System-Dynamics-Modelle. Die für diese Modelle charakteristischen Rückkopplungen führen dazu, dass eine kontinuierliche Änderung der Flussgrößen stattfindet.

### **Diskreter Flussprozess mit stückweise konstanten Flussraten**

Abbildung 4.2c zeigt diskrete Flussprozesse mit stückweise konstanten Flussraten, die durch Nutzung der Hähne H2 und H5 entstehen. Die Flussraten ändern sich sprunghaft zu den Zeitpunkten, zu denen die Hähne betätigt werden. Der resultierende Bestandsentwicklungsprozess ist kontinuierlich und stückweise linear. Auch hier können die Flussgröße  $\lambda$  und die Bestandsgröße  $S$  für die Beschreibung der Prozesse verwendet werden.

Flussprozesse mit stückweise konstanten Flussraten und die resultierenden stückweise linearen Bestandsentwicklungen sind charakteristisch für die in Abschnitt 2.2.5 beschriebenen Discrete-Rate-Simulationsmodelle und für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatz. Die stückweise linearen Bestandsgrößen spielen eine wichtige Rolle, da ihre Linearität die Berechnung von zukünftigen Werten ermöglicht. Der Systemzustand muss somit nur noch neu berechnet werden, wenn sich die Flussraten ändern, was zu einer erheblich geringeren Anzahl an Rechenoperationen im Vergleich zur schrittweisen Berechnung mit hinreichend kleinen Zeitschritten in kontinuierlichen Simulationsmodellen führen kann.

Ein weiterer Vorteil der Linearität der Bestandsgrößen liegt darin, die Eintrittszeitpunkte von Ereignissen genau berechnen zu können, wie beispielsweise das Erreichen von Grenzwerten, und dass die damit verbundenen Änderungen, wie beispielsweise die Steuerung der logistischen Prozesse, auch genau zu diesem Zeitpunkt abgebildet werden können. Das führt zu einer wesentlich höheren Genauigkeit als beim schrittweisen Vorgehen in der kontinuierlichen Simulation, wo es fast immer dazu kommen wird, dass das Erreichen von definierten Grenzwerten zwischen zwei Zeitpunkten geschieht und deswegen diese Ereignisse nicht genau abgebildet werden. Diese Problematik wird sehr anschaulich durch [Krahl 2009, S. 334 ff.] beschrieben.

Stückweise konstante Flussraten eignen sich zur Abbildung von Flüssen, deren Flussraten sich nicht kontinuierlich, sondern nur zu bestimmten Zeitpunkten ändern beziehungsweise deren Verhalten im Modell näherungsweise in dieser Form beschrieben werden kann. Eine Vielzahl von Flusssystemen kann durch lineare kontinuierliche Prozesse beschrieben werden (vgl. [Damiron u. Nastasi 2008, S. 743 ff.]). Stückgutflüsse können mit Hilfe von

stückweise konstanten Flussprozessen abgebildet werden, wenn bei der Analyse die gesamte Menge von Objekten pro Zeiteinheit und nicht die Verfolgung und Unterscheidung einzelner Objekte im Vordergrund steht.

### 4.1.2 Kombinierte Flussprozesstypen

Prozesse in realen Systemen lassen sich nicht immer einem dieser Grundtypen zuordnen. In diesem Abschnitt werden deshalb Kombinationen der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Flussprozessgrundtypen betrachtet.

#### Kontinuierlicher Flussprozess kombiniert mit Impulsen

Abbildung 4.3a zeigt kontinuierliche Flussprozesse (Grundtyp 2) kombiniert mit zeitlosen Impulsen (Grundtyp 1). Der resultierende Verlauf des Bestands ist stückweise kontinuierlich mit diskreten Änderungen. Für die Beschreibung der Prozesse können die Flussgrößen  $\lambda$  und  $M$  und die Bestandsgröße  $S$  genutzt werden. Dieser Prozesstyp kann mit kombinierten diskret-kontinuierlichen Simulationsmodellen (siehe Abschnitt 2.2.4) abgebildet werden.

#### Diskreter Flussprozess mit stückweise konstanten Flussraten und Impulsen

Abbildung 4.3b zeigt diskrete Flussprozesse mit stückweise konstanten Flussraten (Grundtyp 3) und zeitlosen Impulsen (Grundtyp 1). Die resultierende Bestandsgröße ist stückweise linear mit diskreten (sprunghaften) Änderungen. Für die Beschreibung der Prozesse können die Flussgrößen  $\lambda$  und  $M$  und die Bestandsgröße  $S$  genutzt werden.

Dieser kombinierte Prozesstyp wird, wie bereits in Kapitel 3 erläutert wurde, für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten mesoskopischen Simulationsansatz genutzt.

#### Stückweise kontinuierlicher Flussprozess mit diskreten Änderungen

Abbildung 4.3c zeigt stückweise kontinuierliche Flussprozesse mit diskreten Änderungen, die aus der Kombination kontinuierlicher Flussprozesse (Grundtyp 2) und diskreter Flussprozesse mit stückweise konstanten Flussraten (Grundtyp 3) entstehen. Die resultierende Bestandsgröße ändert sich kontinuierlich im Zeitverlauf. Für die Beschreibung der Prozesse können die Flussgröße  $\lambda$  und die Bestandsgröße  $S$  genutzt werden. Dieser Prozesstyp kann mit kombinierten diskret-kontinuierlichen Simulationsmodellen (siehe Abschnitt 2.2.4) abgebildet werden.

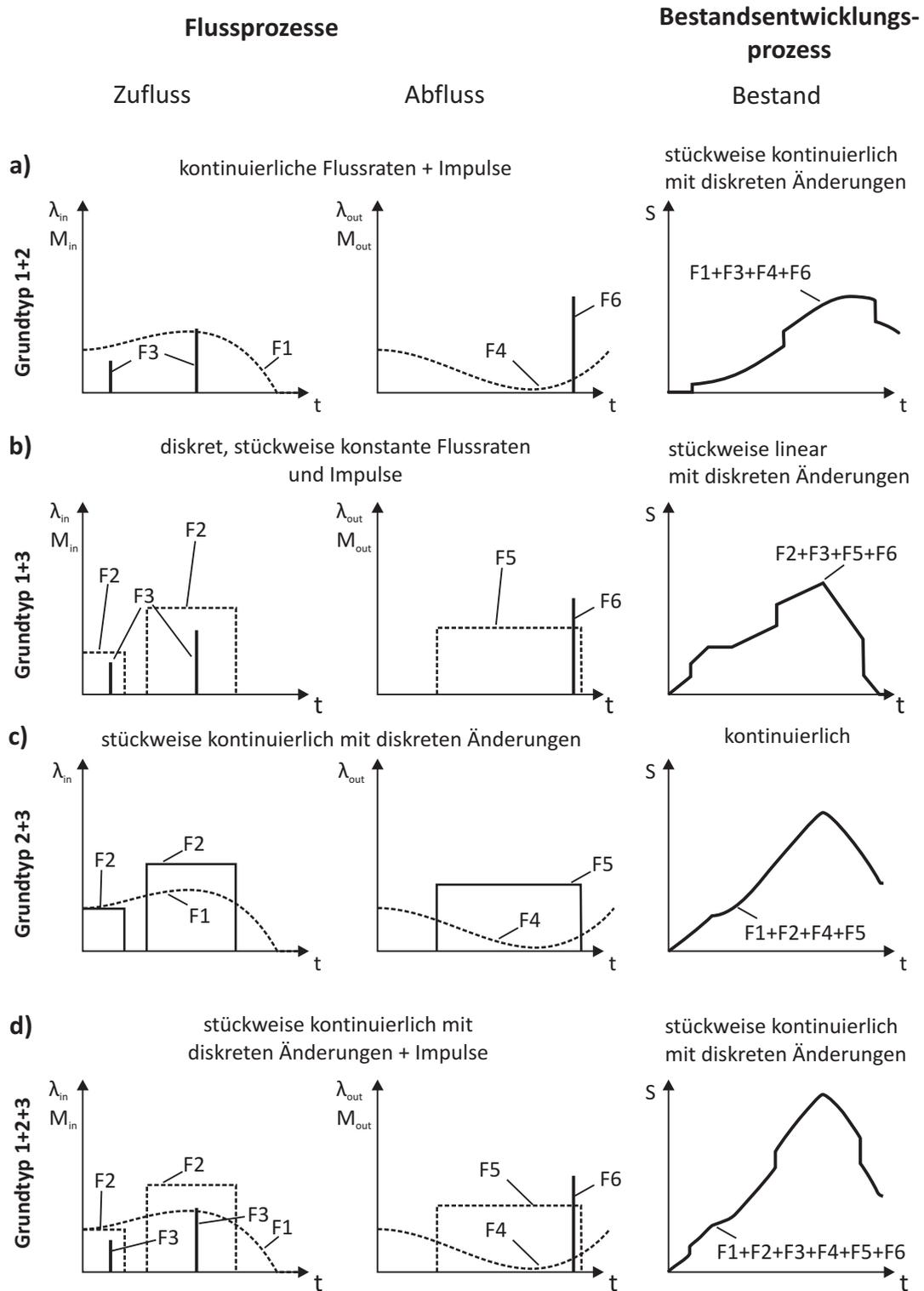


Abbildung 4.3: Kombinierte Prozesstypen in einem Flusssystem

### Stückweise kontinuierlicher Flussprozess mit diskreten Änderungen kombiniert mit Impulsen

Abbildung 4.3d zeigt kontinuierliche Flussprozesse mit diskreten Änderungen (Grundtyp 2 + 3) kombiniert mit zeitlosen Impulsen (Grundtyp 1). Der resultierende Verlauf des Bestands ist stückweise kontinuierlich mit diskreten Änderungen. Für die Beschreibung der Prozesse können die Flussgrößen  $\lambda$  und  $M$  und die Bestandsgröße  $S$  genutzt werden. Dieser Prozesstyp kann mit kombinierten diskret-kontinuierlichen Simulationsmodellen (siehe Abschnitt 2.2.4) abgebildet werden.

## 4.2 Prozessmodelle existierender Simulationskonzepte

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal von Simulationsansätzen ist die Art und Weise des Voranschreitens der Simulationszeit und der damit verbundenen Neuberechnung des Systemzustands im Zeitverlauf. Wie schon im vorherigen Abschnitt wird als elementares Modell eines Flusssystems ein Behälter (siehe Abbildung 4.4) mit seinen Zu- und Abflüssen genutzt, um die Art und Weise der Berechnung der Zustandsgrößen des modellierten Systems im Zeitverlauf bei den unterschiedlichen Simulationsansätzen darzustellen. Für die Darstellung des Behälters wird die System-Dynamics-Notation verwendet.

Im vorhergehenden Abschnitt wurden bereits die Flussgröße  $\lambda$  für die Intensität eines Flusses und  $M$  für die Menge eines zeitlosen Impulses und die Bestandsgröße  $S$  für den Bestand eines Behälters definiert. Zusätzlich wird jetzt noch die kumulierte Flussmenge  $C$  eingeführt.

Der Bestand eines Behälters zum Zeitpunkt  $t_{i+1}$  charakterisiert den Systemzustand und lässt sich aus dem Bestand zum Zeitpunkt  $t_i$  und den kumulierten Zu- und Abflüssen während des Zeitschritts  $[t_i, t_{i+1}]$  berechnen:

$$S(t_{i+1}) = S(t_i) + C_{in}(t_i, t_{i+1}) - C_{out}(t_i, t_{i+1}). \quad (4.1)$$

Wenn der Anfangsbestand  $S(t_i)$  bekannt ist, werden für die Berechnung von  $S(t_{i+1})$  die Werte für die kumulierten Zu- und Abflüsse  $C_{in}(t_i, t_{i+1})$  und  $C_{out}(t_i, t_{i+1})$  benötigt. Die nachfolgenden Abschnitte erläutern, wie oft und nach welchen Prinzipien  $C_{in}(t_i, t_{i+1})$  und  $C_{out}(t_i, t_{i+1})$  bei der kontinuierlichen, bei der ereignisdiskreten und bei der Discrete-Rate-Simulation ermittelt werden. Anschließend wird darauf aufbauend das Prozessmodell der mesoskopischen Simulation erläutert.



Abbildung 4.4: Elementares Flussmodell

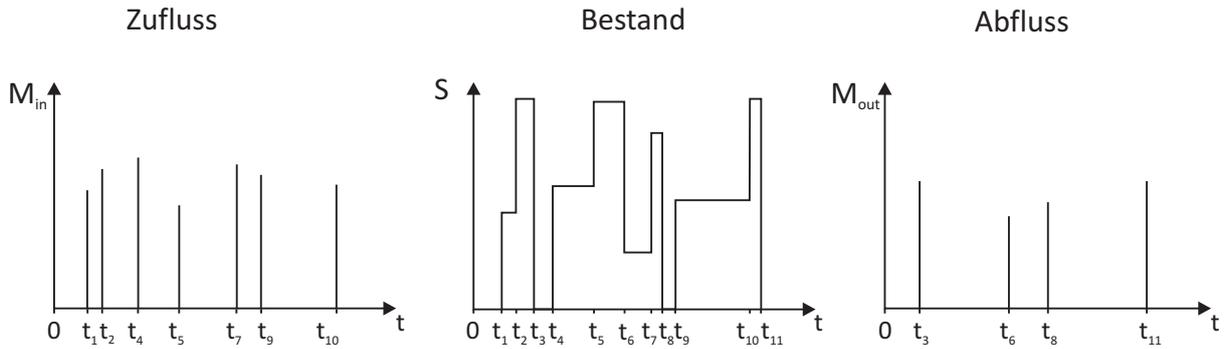


Abbildung 4.5: Prozessmodell der ereignisdiskreten Simulation

### 4.2.1 Prozessmodell der ereignisdiskreten Simulation

Für ereignisdiskrete Simulationsmodelle, die in der Logistik genutzt werden, ist der in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Flussprozessgrundtyp mit impulsförmigen Flüssen und einer daraus resultierenden stufenförmigen Entwicklung der Bestandsgrößen charakteristisch (siehe Abbildung 4.5).

Im Gegensatz zur kontinuierlichen Simulation, in der sich die Zustandsvariablen, die den Systemzustand beschreiben, kontinuierlich mit der Zeit ändern, ändert sich der Systemzustand in ereignisdiskreten Modellen nur dann, wenn Ereignisse auftreten.

Die steigende Simulationszeit nimmt nur Werte  $t_i$  an, die den Ereignissen der Flüsse entsprechen, so dass der Zeitschritt  $\Delta t$  variabel ist:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i = \text{var}. \quad (4.2)$$

Zu jedem Ereigniszeitpunkt  $t_{i+1}$  wird abhängig davon, ob es sich um einen Input- oder Outputfluss handelt, entweder  $C_{in}(t_i, t_{i+1})$  oder  $C_{out}(t_i, t_{i+1})$  berechnet:

$$C_{in}(t_i, t_{i+1}) = M_{in}(t_{i+1}) \text{ und } C_{out}(t_i, t_{i+1}) = 0, \quad (4.3)$$

wenn der Ereignistyp *input* ist.

$$C_{out}(t_i, t_{i+1}) = M_{out}(t_{i+1}) \text{ und } C_{in}(t_i, t_{i+1}) = 0, \quad (4.4)$$

wenn der Ereignistyp *output* ist.

Für den Bestand folgt:

$$S(t_{i+1}) = \begin{cases} S(t_i) + M_{in}(t_{i+1}), & \text{wenn Ereignistyp } input, \\ S(t_i) - M_{out}(t_{i+1}), & \text{wenn Ereignistyp } output. \end{cases} \quad (4.5)$$

### 4.2.2 Prozessmodell der kontinuierlichen Simulation

Kontinuierliche Simulationsmodelle finden in Form von System-Dynamics-Modellen auf dem Gebiet der strategischen Planung im Supply Chain Management Anwendung. Des-

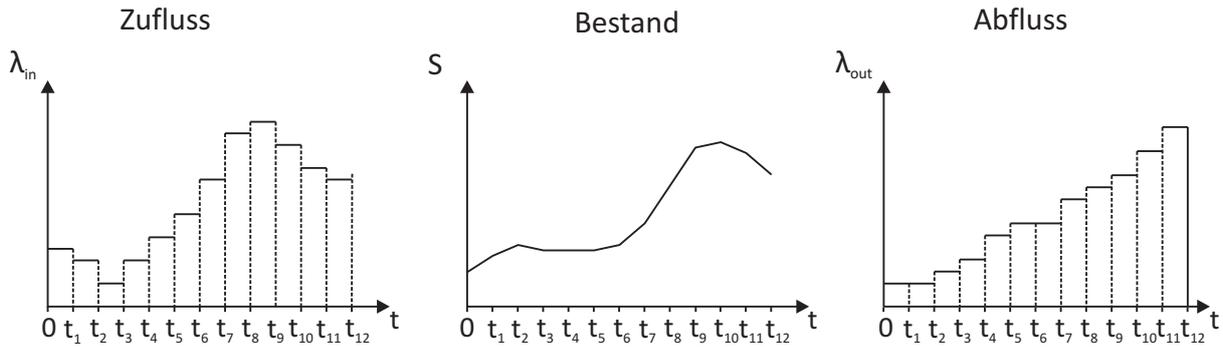


Abbildung 4.6: Prozessmodell der kontinuierlichen Simulation

halb wird hier auf das Prozessmodell von System-Dynamics-Modellen eingegangen. Typisch für System-Dynamics-Modelle ist der in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Flussprozessgrundtyp mit einer kontinuierlichen Änderung der Flussintensitäten aufgrund von Rückkopplungsschleifen.

Um kontinuierliche Flussprozesse mit Digitalrechnern abbilden zu können, ist eine Diskretisierung der Zeit- und Zustandsachse notwendig. Der Zustand des abgebildeten Systems wird nur zu den diskreten Zeitpunkten neu berechnet. Bei der Berechnung kontinuierlicher Simulationsmodelle ist der Zeitabstand  $\Delta t$  zwischen nacheinander folgenden Zeitpunkten  $t_i$  und  $t_{i+1}$  in der Regel konstant:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i = \text{const.} \quad (4.6)$$

Es wird die Annahme getroffen, dass die Flussintensitäten  $\lambda_{in}(t_i)$  und  $\lambda_{out}(t_i)$  innerhalb des Zeitschritts  $[t_i, t_{i+1}]$  konstant sind (siehe Abbildung 4.6). Diese Annahme kann nur unter der Bedingung aufrecht erhalten werden, dass die Modelldynamik während eines Zeitschritts nicht zu groß beziehungsweise der Zeitschritt ausreichend klein ist. Wenn die Flussraten  $\lambda_{in}(t_i)$  und  $\lambda_{out}(t_i)$  bekannt sind, können die Werte für die kumulierten In- und Outputflüsse  $C_{in}(t_i, t_{i+1})$  und  $C_{out}(t_i, t_{i+1})$  und damit auch die Bestandsgröße  $S(t_{i+1})$  ermittelt werden (siehe Formeln (4.7), (4.8) und (4.9)). Formel (4.9) ist auch bekannt als Euler Integration und wird bei den meisten System-Dynamics-Simulatoren als Standardeinstellung verwendet [Sterman 2000, S.904].

$$C_{in}(t_i, t_{i+1}) = \lambda_{in}(t_i) \cdot \Delta t \quad (4.7)$$

$$C_{out}(t_i, t_{i+1}) = \lambda_{out}(t_i) \cdot \Delta t \quad (4.8)$$

$$S(t_{i+1}) = S(t_i) + (\lambda_{in}(t_i) - \lambda_{out}(t_i)) \cdot \Delta t \quad (4.9)$$

Die Größe des Zeitschritts  $\Delta t$  spielt bei der kontinuierlichen Simulation eine wichtige Rolle, da sie einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Simulation hat. Wie bereits erwähnt sind Rückkopplungen (Feedbacks) typisch für System-Dynamics-Modelle. Die Intensitäten der Flüsse hängen deswegen oft von den aktuellen Bestandsmengen ab, wie

in der Darstellung eines System-Dynamics-Modells in Abbildung 2.12 in Abschnitt 2.2.3 zu sehen ist. Der Zeitschritt  $\Delta t$  muss klein genug sein, damit sich die Bestandsmengen am Anfang und am Ende des Zeitschritts nicht wesentlich voneinander unterscheiden, um Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Flussraten zu vermeiden, da die Rückkopplung mit der Zeitverzögerung  $\Delta t$  erfolgt. Ein kleiner Zeitschritt verursacht jedoch einen hohen Berechnungsaufwand.

Ein weiterer Grund für die Bedeutung der Größe des Zeitschritts  $\Delta t$  sind mögliche Rückflüsse in einem System-Dynamics-Modell. Der Zeitschritt  $\Delta t$  sollte aus Gründen der Abbildungsgenauigkeit nicht zu groß sein, da die Rückflüsse erst mit der Verzögerung eines Zeitschritts erfolgen.

Die durch einen zu großen Zeitschritt verursachten Ungenauigkeiten werden als Integrationsfehler bezeichnet. Andererseits kann ein zu kleiner Zeitschritt Rundungsfehler nach sich ziehen. Nachfolgend wird deshalb näher auf die Auswahl eines geeigneten Simulationszeitschritts  $\Delta t$  im Spannungsfeld zwischen Integrations- und Rundungsfehler eingegangen.

### **Auswahl des Simulationszeitschritts**

Die Annahme konstanter Flussraten ist nur vertretbar, wenn die Modelldynamik (Änderungsgeschwindigkeit der Flussraten über der Zeit) nicht zu groß ist und der Simulationszeitschritt  $\Delta t$  klein genug ist. Je kleiner  $\Delta t$  ist und je geringer die Modelldynamik ist, umso größer ist die Genauigkeit der Euler Integration.

Nachteile eines zu kleinen Zeitschritts sind jedoch eine längere Simulationszeit und auftretende Rundungsfehler. Wenn der Zeitschritt  $\Delta t$  zu klein ist, kann es dazu kommen, dass der Gesamtfehler, der sich aus Integrationsfehler und Rundungsfehler zusammensetzt, insgesamt größer wird, da die kumulierten Effekte der Rundungen die Reduktion des Integrationsfehlers übertreffen. Deswegen ist die Wahl des richtigen Zeitschritts ein Abwägen zwischen Integrationsfehler auf der einen Seite und Simulationskosten und Rundungsfehler auf der anderen Seite. [Sterman 2000, S. 907]

Bei der Wahl des Zeitschritts sollte zuerst die geforderte Genauigkeit Berücksichtigung finden. Weiterhin sollte der Zeitschritt mit den Intervallen der gegebenen beziehungsweise gesuchten Daten übereinstimmen. Es ist beispielsweise nicht sinnvoll, ein Modell mit vierteljährlichen Daten mit einem Zeitschritt von 0,2 Jahren zu modellieren. Eine Faustregel besagt, den Zeitschritt auf einen Wert zwischen einem Viertel und einem Zehntel der kleinsten Zeiteinheit im Modell festzulegen. In großen Modellen ist es jedoch oft schwierig, die kleinste Zeiteinheit abzuschätzen, weswegen hier die Sensitivität der Ergebnisse in Abhängigkeit von der Größe von  $\Delta t$  überprüft werden muss. [Sterman 2000, S. 907]

Dabei geht man nach [Sterman 2000, S. 907] folgendermaßen vor:

1. Simulationslauf mit der bestmöglichen Abschätzung für den Simulationszeitschritt

$\Delta t$ .

2. Simulationszeitschritt  $\Delta t$  halbieren.
3. Simulationslauf mit halbiertem  $\Delta t$ .
4. Vergleich beider Ergebnisse.
5. Schritte 2 und 3 wiederholen, bis sich die Ergebnisse nicht mehr signifikant unterscheiden.

Rundungsfehler können folgendermaßen minimiert werden. Da Computer das Binärsystem nutzen, kann der Fehler durch die Wahl eines  $\Delta t$ , das mit der Basis 2 dargestellt werden kann, minimiert werden. Verbreitet ist die Wahl von 2er Potenzen (z. B. 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125 etc.) für  $\Delta t$ . Ein  $\Delta t$  von 0,3 ist keine gute Wahl, da seine Basis 2 Darstellung 0,01001001001001... ist und abgerundet wird, so dass nach  $n$  Zeitschritten der berechnete Wert der Zeit geringer ist als  $n \cdot \Delta t$ . [Sterman 2000, S. 908]

Wenn die Zeit in Jahren gemessen wird und die Daten monatsweise vorliegen, wäre eine mögliche Wahl für  $\Delta t$  0,0833 Jahre, um es mit den Daten in Übereinstimmung zu bringen. Ein gewählter Zeitschritt von 0,0833 und die damit verbundenen Abrundungen führen zu der oben beschriebenen Aufsummierung des Rundungsfehlers. Bei einem insgesamt geringen Zeithorizont werden dadurch keine großen Probleme verursacht. Bei größeren Zeithorizonten für die Simulation ist eine Zeitmessung in Monaten zu bevorzugen, um Rundungsfehler zu vermeiden. [Sterman 2000, S. 908]

### 4.2.3 Prozessmodell der Discrete-Rate-Simulation

Grundlage der Discrete-Rate-Simulation ist der in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Flussprozessgrundtyp mit stückweise konstanten Flussraten und daraus resultierenden stückweise linearen Verläufen der Bestandsgrößen und kumulierten Flussmengen (siehe Abbildung 4.7).

Die Linearität der Entwicklung des Systemzustands hat große Vorteile. Der Systemzustand kann somit zu beliebigen Zeitpunkten einfach berechnet werden. Es ist kein Vorschreiten der Simulationszeit mit hinreichend kleinen Zeitschritten mehr notwendig. Der Systemzustand muss somit nur noch neu berechnet werden, wenn sich die stückweise konstanten Flussraten ändern, was mit einem Ereignis verbunden ist. Somit ist ein ereignisbasiertes Vorgehen möglich. Discrete-Rate-Modelle können demzufolge mit einem variablen Zeitschritt  $\Delta t_{var}$  arbeiten:

$$\Delta t_{var} = t_{i+1} - t_i = var. \quad (4.10)$$

Dieses ereignisbasierte Vorgehen verringert die Anzahl der notwendigen Berechnungen im Vergleich zum kontinuierlichen Vorschreiten der Simulationszeit mit konstanten Zeitschritten bei kontinuierlichen Simulationsmodellen, in denen der Simulationszeitschritt

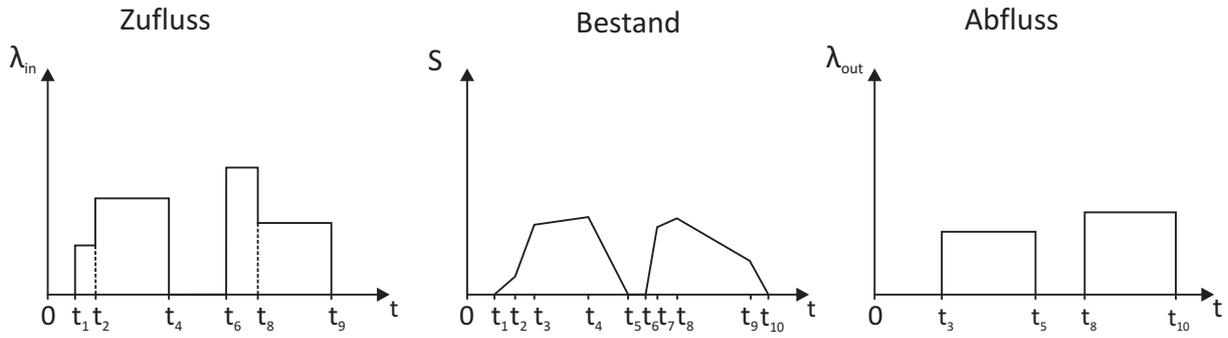


Abbildung 4.7: Prozessmodell der Discrete-Rate-Simulation

aus Genauigkeitsgründen hinreichend klein sein muss, was zu einer großen Anzahl an Berechnungen führen kann.

Ein weiterer Vorteil ist die höhere Genauigkeit von Discrete-Rate-Modellen bei der Abbildung linearer kontinuierlicher Flusssysteme im Vergleich zum kontinuierlichen Simulationsansatz. Durch die lineare Entwicklung der Bestandsgrößen können die Zeitpunkte berechnet werden, zu denen vorab definierte Systemzustände bezüglich der Bestandsgrößen  $S$  und der kumulierten Flussgrößen  $C$  eintreffen. Dadurch können Ereignisse exakt zu diesen Zeitpunkten geplant werden und Steuerungen können exakt im Modell implementiert werden. Beim kontinuierlichen Simulationsansatz ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, dass das Erreichen bestimmter Systemzustände zwischen zwei Zeitschritten liegt und somit nicht genau zum tatsächlichen Zeitpunkt abgebildet wird. Sehr anschaulich wird der Vorteil der ereignisbasierten Simulation linearer kontinuierlicher Flusssysteme in Discrete-Rate-Modellen gegenüber dem kontinuierlichen Simulationsansatz durch [Damiron u. Nastasi 2008, S. 741 ff.] am Beispiel der Füll- und Leerprozesse an einem Tank beschrieben.

Die Berechnung der Bestandsgrößen erfolgt nach den gleichen Formeln wie bei der kontinuierlichen Simulation (siehe Formeln 4.7, 4.8 und 4.9 in Abschnitt 4.2.2). Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Simulationszeitschritt in der Discrete-Rate-Simulation variabel ist und durch Ereignisse bestimmt wird:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i = \text{var.} \quad (4.11)$$

### 4.3 Mesoskopisches Prozessmodell

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben wurde, kombiniert das mesoskopische Prozessmodell Eigenschaften der Discrete-Rate-Simulation und der ereignisdiskreten Simulation. Mesoskopische Simulationsmodelle arbeiten mit stückweise konstanten Flussraten und impulsförmigen Mengen für die Abbildung von Flussprozessen (siehe Abbildung 4.8). Dieses

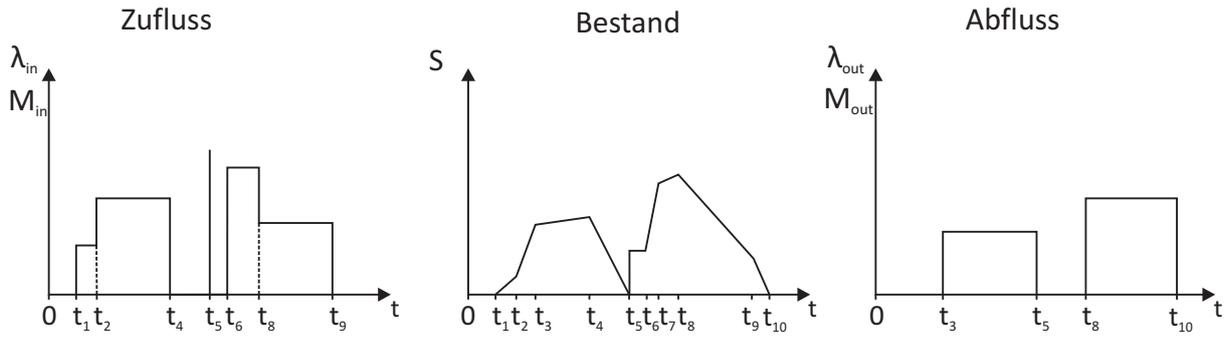


Abbildung 4.8: Prozessmodell der mesoskopischen Simulation

Prozessmodell entspricht dem kombinierten Prozesstyp aus Abbildung 4.3b. Der resultierende Verlauf der Bestandsgrößen ist stückweise linear mit sprunghaften Änderungen, die durch die impulsförmigen Flüsse verursacht werden.

Die Linearität in der Entwicklung des Systemzustands und die damit verbundene Möglichkeit der Ereignisplanung haben große Vorteile hinsichtlich Abbildungsgenauigkeit und Rechenaufwand gegenüber der kontinuierlichen Simulation linearer Flussprozesse, wie bereits in den Abschnitten 2.2.5 und 3.1 ausführlich beschrieben wurde. Zustandsabhängige Steuerungen können zum exakten Zeitpunkt abgebildet werden.

Mesoskopische Modelle können demzufolge mit einem variablen Zeitschritt  $\Delta t_{var}$  arbeiten:

$$\Delta t_{var} = t_{i+1} - t_i = var \quad (4.12)$$

und der Systemzustand wird wie folgt berechnet:

$$S(t_{i+1}) = S(t_i) + (\lambda_{in}(t_i) - \lambda_{out}(t_i)) \cdot \Delta t + M_{in}(t_{i+1}) - M_{out}(t_{i+1}). \quad (4.13)$$

Für den Fall, dass zu viele Ereignisse geplant werden, kann ein variabler Zeitschritt zu höherem Rechenaufwand führen als ein fixer Zeitschritt. Die Planung einer sehr großen Anzahl an Ereignissen ist jedoch nicht typisch für die mesoskopische Sichtweise, da keine einzelnen Objekte abgebildet werden, sondern immer mit Mengen von Objekten gearbeitet wird.

Ein mesoskopisches Modell besitzt somit hybride Eigenschaften:

- Die logistischen Flüsse werden wie in der kontinuierlichen flussbasierten Simulation durch Flussraten beschrieben.
- Für die Bestandsgrößen können aufgrund ihrer linearen Entwicklung zukünftige Ereignisse geplant werden. Weiterhin können mesoskopische Modelle impulsförmige Produktflüsse wie in der objektbasierten ereignisdiskreten Simulation nutzen.

Ein Modell mit vorwiegend aus Impulsen bestehenden Flüssen ist jedoch nicht Ziel des mesoskopischen Ansatzes, da sich die mesoskopischen Modelle dann in Richtung ereignisdiskreter Modelle entwickeln und mit einem hohen Aufwand für die Modellerstellung und

-berechnung verbunden sind. Impulse sollen bei der mesoskopischen Modellierung und Simulation nur verwendet werden, wenn es für die Abbildung der logistischen Flussprozesse unbedingt notwendig ist. Für die Abbildung von gebündelten Materialflüssen wie beispielsweise bei LKW-Transporten kann das der Fall sein. Ansonsten sollen entsprechend dem Flussgedanken des mesoskopischen Ansatzes Flüsse mit stückweise konstanten Flussraten zur Modellierung genutzt werden, um den Rechenaufwand gering zu halten.

Als Zeitmechanismus wäre neben der Berechnung mit variablen Zeitschritten und den damit verbundenen Vorteilen auch die Nutzung eines festen Zeitschritts wie in der kontinuierlichen Simulation (siehe Abschnitt 2.2.3) möglich. Ein fester Zeitschritt hat den Vorteil, dass die Berechnung dieser Modelle relativ einfach ohne eine spezielle Simulationssoftware implementiert werden kann, da kein Mechanismus für die Behandlung von Ereignissen umgesetzt werden muss. Für logistische Problemstellungen, wo die Steuerung nur zu festen Zeitpunkten möglich ist (z. B. schichtweise Anpassung der verfügbaren Ressourcen) und die Dynamik der relevanten Größen während eines Zeitschritts gering ist, ist auch eine Modellberechnung mit festen Zeitschritten ausreichend.

Ein fester Zeitschritt ist jedoch auch mit Nachteilen verbunden. Bei der Wahl eines zu großen fixen Zeitschritts kommt es zu Ungenauigkeiten bei der Abbildung des Systemverhaltens. Ist der Zeitschritt zu klein, erhöht sich der Berechnungsaufwand für das Modell. Ausführlichere Betrachtungen dazu finden sich in den vorherigen Abschnitten und beispielsweise bei [Damiron u. Nastasi 2008].

Anhand der Abbildungsgenauigkeit zustandsabhängiger Steuerungen, logistischer Flussobjekte und von Eingangsdaten sollen nachfolgend die Unterschiede zwischen der Modellierung mit variablen und festen Zeitschritten deutlich gemacht werden:

- **Abbildungsgenauigkeit zustandsabhängiger Steuerungen**

Bei der Verwendung von variablen Zeitschritten werden Ereignisse wie das Erreichen von vorher definierten Systemzuständen genau zum Zeitpunkt ihres Auftretens abgebildet. Bei festen Zeitschritten können Ereignisse nur an den Grenzen eines Zeitintervalls zu den fest vorgegebenen Zeitpunkten abgebildet werden. Wenn das Eintreten eines Ereignisses über die Modellsteuerung weitere Ereignisse auslöst, kann es bei einem festem Zeitschritt zu einer verzerrten Abbildung des Systemverhaltens kommen.

- **Abbildungsgenauigkeit logistischer Flussobjekte**

Bei der Verwendung variabler Zeitschritte ist es durch die Nutzung von Produktportionen möglich, unterschiedlich lange Fragmente eines Flusses zu unterscheiden. Der Weg dieser Produktportionen kann verfolgt werden. Weiterhin können Steuerungen bezüglich der Ressourcenverteilung und der Verteilung der Flüsse implementiert werden, die abhängig von den Attributen der Produktportionen sind. Bei der Verwendung fixer Zeitschritte ist das nur begrenzt möglich, wenn der Anfang und

das Ende einer Produktportion mit den fixen Zeitpunkten der Modellberechnung übereinstimmen.

- **Abbildungsgenauigkeit von Eingangsdaten**

Bei einem festen Zeitschritt müssen die Eingangsflüsse in das System bei ihrer Abbildung im Modell entsprechend der Größe des Zeitschritts transformiert werden. Ein Beispiel dazu findet sich bei [Schenk et al. 2008b]. Das gilt auch für impulsförmige Flüsse, die entweder zu Beginn oder Ende eines Zeitintervalls abgebildet werden müssen oder in Flussintensitäten  $\lambda$  transformiert werden müssen. Durch diese Transformationen entstehen Ungenauigkeiten. Die Verzerrungen sind umso größer, je größer die Dynamik der Eingangsdaten während eines Zeitschritts ist.

Diese Probleme könnten bis zu einem gewissen Grad durch die Wahl mehrerer fester Zeitschritte behoben werden. Dafür müssen jedoch bereits in der konzeptionellen Modellierungsphase die Eingangsströme und ihre Dynamik bekannt sein. Dieses Vorgehen ist auch nur dann sinnvoll, wenn sich die Dynamik der unterschiedlichen Systemlasten, mit denen das Modell in verschiedenen Konstellationen berechnet werden soll, nicht wesentlich voneinander unterscheidet.

Bei der Verwendung eines variablen Zeitschritts hingegen kann der Zeitschritt dynamisch an die Dynamik der Eingangsflüsse angepasst werden und Impulse können exakt an den Zeitpunkten ihres Auftretens abgebildet werden.

### Vergleich variabler und konstanter Zeitschritt

Am Beispiel der Berechnung der Fluss- und Bestandsgrößen an einem Behälter (siehe Abbildung 4.9) soll die Vorteilhaftigkeit der Verwendung eines variablen Zeitschritts gegenüber der Verwendung eines konstanten Zeitschritts in Bezug auf die Abbildungsgenauigkeit der modellierten Prozesse verdeutlicht werden.

Die Größe des Outputflusses  $\lambda_{out}$  eines Behälters ist abhängig vom Inputfluss  $\lambda_{in}$ , vom maximal möglichen Outputfluss  $\lambda_{out}^{max}$  und davon, ob sich im Behälter ein Bestand befindet oder nicht (siehe Formel 4.14). Wenn der Bestand im Behälter größer als Null ist oder der Inputfluss mindestens so groß wie der maximal mögliche Outputfluss ist, entspricht der tatsächliche Outputfluss  $\lambda_{out}$  dem maximal möglichen Outputfluss  $\lambda_{out}^{max}$ . Wird der Behälter jedoch leer, was dann geschieht, wenn der Inputfluss  $\lambda_{in}$  kleiner ist als der maximal mögliche Outputfluss  $\lambda_{out}^{max}$ , ändert sich die Berechnung für den Outputfluss. Der Outputfluss  $\lambda_{out}$  entspricht dann genau dem Inputfluss  $\lambda_{in}$ .

$$\lambda_{out}(t_i) = \begin{cases} \lambda_{out}^{max}(t_i), & \text{wenn } S(t_i) > 0 \text{ oder } \lambda_{in}(t_i) \geq \lambda_{out}^{max}(t_i) \\ \lambda_{in}(t_i), & \text{wenn } S(t_i) = 0 \text{ und } \lambda_{in}(t_i) \leq \lambda_{out}^{max}(t_i) \end{cases} \quad (4.14)$$

Folgende Unterschiede gibt es zwischen der Anwendung eines fixen und variablen Zeitschritts:

- **Fixer Zeitschritt**  $\Delta t_{fix}$ : Der nächste Zeitpunkt eines Prozesses  $t_{i+1}^{fix}$ , zu dem die Modellgrößen neu berechnet werden, wird durch den fixen Zeitschritt  $\Delta t_{fix}$  bestimmt. Dadurch wird das Ereignis „Behälter wird leer“ erst am Ende des fixen Zeitschritts zum Zeitpunkt  $t_{i+1}^{fix}$  abgebildet, was dazu führt, dass der Outputfluss im Zeitverlauf nicht korrekt abgebildet wird (siehe Abbildung 4.9).
- **Variabler Zeitschritt**  $\Delta t_{var}$ : Die Größe des nächsten Zeitschritts  $\Delta t_{var}$  des Prozesses, nach dem die Modellgrößen neu berechnet werden, wird durch den Zeitpunkt  $t_{i+1}^{var}$  bestimmt, zu dem das Auftreten des Ereignisses „Behälter wird leer“ berechnet wird. Dadurch wird das Ereignis „Behälter wird leer“ genau zu dem Zeitpunkt  $t_{i+1}^{var}$  abgebildet, zu dem es eintritt (siehe Abbildung 4.9). Der Outputfluss wird demzufolge im Zeitverlauf korrekt abgebildet.

Für das Beispiel wird angenommen, dass sich der abzubildende Prozess im Zeitpunkt  $t_i$  befindet, an dem folgende Größen gegeben sind (siehe oberer Teil der Abbildung 4.9):

- der Bestand des Behälters am Anfang des Zeitschritts  $S(t_i) = S^0$ ,
- die konstante Flussintensität des Inputflusses des Behälters für den nächsten Zeitschritt  $\lambda_{in}(t_i)$
- die maximal mögliche Intensität des Outputflusses für den nächsten Zeitschritt  $\lambda_{out}^{max}(t_i)$
- der fixe Zeitschritt  $\Delta t_{fix} = t_{i+1}^{fix} - t_i$ .

Weiterhin gilt:

$$S^0 > 0 \text{ und } \lambda_{in}(t_i) < \lambda_{out}^{max}(t_i), \quad (4.15)$$

so dass das Ereignis „Behälter wird leer“ generell eintreten kann.

Damit das Ereignis „Behälter wird leer“ während des nächsten fixen Zeitschritts auf jeden Fall eintritt, muss die Summe aus Anfangsbestand und kumuliertem Inputfluss kleiner sein als der maximal mögliche kumulierte Outputfluss (siehe Abbildung 4.9):

$$\begin{aligned} S(t_i) + C_{in}(t_i, t_{i+1}^{fix}) &< C_{out}^{max}(t_i, t_{i+1}^{fix}) \\ S(t_i) + \lambda_{in}(t_i) \cdot \Delta t_{fix} &< \lambda_{out}^{max}(t_i) \cdot \Delta t_{fix}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Für den nächsten Zeitpunkt des Prozesses bei fixem Zeitschritt gilt:

$$t_{i+1}^{fix} = t_i + \Delta t_{fix} \quad (4.17)$$

Zu Berechnen ist die tatsächliche Outputflussrate  $\lambda_{out}$  für den nächsten Zeitschritt  $[t_i, t_{i+1}^{fix}]$ , was im folgenden für einen konstanten und variablen Zeitschritt gezeigt wird.

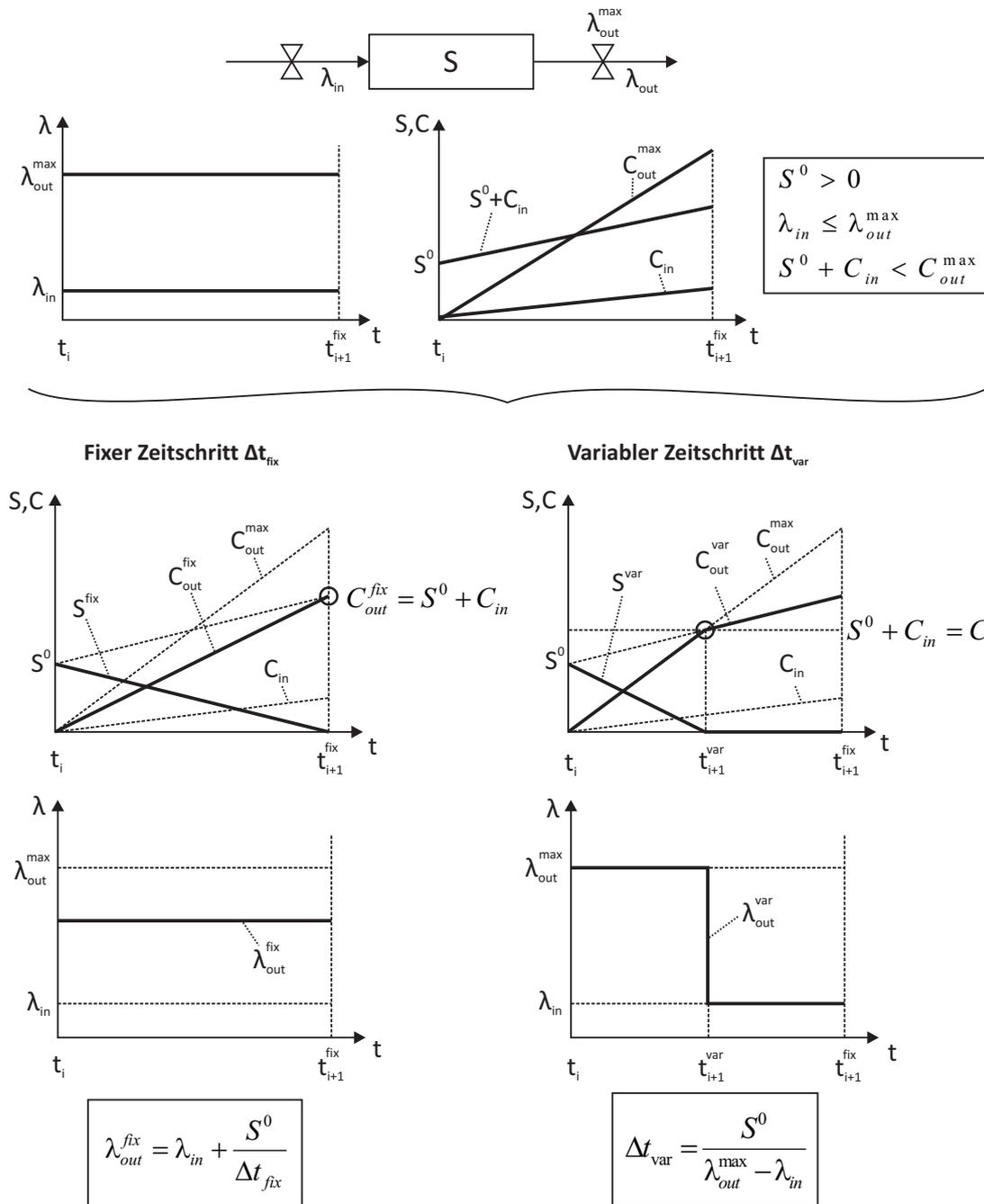


Abbildung 4.9: Prozesse an einem Behälter bei fixem und variablem Zeitschritt

- **Fixer Zeitschritt**

Das Ereignis „Behälter wird leer“ wird am Ende des Zeitschritts abgebildet, da bei fixem Zeitschritt  $\Delta t_{fix}$  keine Änderungen der Flussprozesse innerhalb eines Zeitintervalls dargestellt werden können. Deshalb wird angenommen, dass die Summe aus dem Bestand des Behälters zu Beginn des Zeitschritts und dem kumuliertem Inputfluss des Zeitschritts gleich dem kumuliertem Outputfluss des Zeitschritts ist:

$$\begin{aligned} S^0 + C_{in}(t_i, t_{i+1}^{fix}) &= C_{out}^{fix}(t_i, t_{i+1}^{fix}) \\ S^0 + \lambda_{in}(t_i) \cdot \Delta t_{fix} &= \lambda_{out}^{fix}(t_i) \cdot \Delta t_{fix}, \end{aligned} \quad (4.18)$$

was jedoch dazu führt, dass  $\lambda_{out}^{fix}(t_i)$  nicht dem realen Prozessverlauf von  $\lambda_{out}$  während des Zeitschritts  $[t_i, t_{i+1}^{fix}]$  entspricht (siehe Abbildung 4.9).

Aus Gleichung 4.18 folgt für die Berechnung der Outputflussintensität bei fixem Zeitschritt:

$$\begin{aligned} \lambda_{out}^{fix}(t_i) &= \frac{S^0 + \lambda_{in}(t_i) \cdot \Delta t_{fix}}{\Delta t_{fix}} \\ &= \lambda_{in}(t_i) + \frac{S^0}{\Delta t_{fix}} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Eine konstante Intensität  $\lambda_{out}^{fix}$  bedeutet, dass der Bestand des Behälters  $S^{fix}$  im Intervall  $\Delta t_{fix}$  linear auf Null sinkt. Der reale Zeitpunkt  $t_{i+1}^{var}$ , zu dem der Behälter leer wird und die damit verbundenen realen Intensitäten des Outputflusses werden in diesem Fall nicht ermittelt.

- **Variabler Zeitschritt**

Im Gegensatz dazu basiert die mesoskopische Simulation mit variablem Zeitschritt  $\Delta t_{var}$  auf der vorläufigen Berechnung beziehungsweise Planung von Zeitpunkten vom Typ  $t_{i+1}^{var} = t_i + \Delta t_{var}$ , zu denen bestimmte Bedingungen erfüllt werden. Das Ereignis „Behälter wird leer“ tritt zu dem Zeitpunkt ein, zu dem die Bedingung, dass die Summe aus Anfangsbestand und kumuliertem Inputfluss gleich der Summe des kumulierten Outputflusses ist, wahr wird:

$$\begin{aligned} S^0 + C_{in}(t_i, t_{i+1}^{var}) &= C_{out}(t_i, t_{i+1}^{var}) \\ S^0 + \lambda_{in}(t_i) \cdot \Delta t_{var} &= \lambda_{out}(t_i) \cdot \Delta t_{var} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Für  $S(t) > 0$  gilt  $\lambda_{out}(t) = \lambda_{out}^{max}(t)$ , so dass:

$$S^0 + \lambda_{in}(t_i) \cdot \Delta t_{var} = \lambda_{out}^{max}(t_i) \cdot \Delta t_{var} \quad (4.21)$$

Daraus folgt für die Berechnung des variablen Zeitschritts:

$$\Delta t_{var} = \frac{S^0}{\lambda_{out}^{max}(t_i) - \lambda_{in}(t_i)} \quad (4.22)$$

Es wurden somit die beiden Zeitintervalle  $[t_i, t_{i+1}^{var}]$  und  $[t_{i+1}^{var}, t_{i+1}^{fix}]$  gebildet. Im ersten Intervall  $[t_i, t_{i+1}^{var}]$  ist die reale Intensität  $\lambda_{out}^{var}(t_i)$  gleich dem Grenzwert  $\lambda_{max}^{out}(t_i)$  und im zweiten Intervall  $[t_{i+1}^{var}, t_{i+1}^{fix}]$  gleich dem Wert  $\lambda_{in}(t_i)$  (siehe Abbildung 4.9). Der Bestand des Behälters sinkt im Zeitintervall  $[t_i, t_{i+1}^{var}]$  linear auf Null und bleibt während des gesamten Zeitintervalls  $[t_{i+1}^{var}, t_{i+1}^{fix}]$  auf diesem Niveau.

Dieses Beispiel hat gezeigt, dass die Abbildung mit variablem Zeitschritt wesentlich genauer ist als mit fixem Zeitschritt. Die Ungenauigkeit der Abbildung mit fixem Zeitschritt kann zu weiteren Verzerrungen im Modell führen, wenn das erst an den Intervallgrenzen und nicht zum realen Zeitpunkt abgebildete Ereignis „Behälter wird leer“ Bedingung für die Ausführung weiterer Aktionen im Modell ist, wie zum Beispiel das Umrüsten einer Produktionslinie oder das Auslösen einer neuen Bestellung in einem Kanban-Regelkreis.

## Fazit

Tabelle 4.1 fasst die wesentlichen Eigenschaften des mesoskopischen Prozessmodells im Vergleich mit den zuvor beschriebenen Ansätzen der kontinuierlichen, ereignisdiskreten und Discrete-Rate-Simulation zusammen.

Tabelle 4.1: Prozessmodelle der Simulationsansätze im Vergleich

	<b>Ereignisdiskrete Simulation</b>	<b>Mesoskopische Simulation</b>	<b>Discrete-Rate-Simulation</b>	<b>Kontinuierliche Simulation (System Dynamics)</b>
Flussprozesse	Impulse	Stückweise konstante Flussraten und Impulse	Stückweise konstante Flussraten	Kontinuierlich
Kumulierte Flussgrößen	Stufenförmig	Stückweise linear, diskrete Änderungen	Stückweise linear	Kontinuierlich
Zustandsänderungen durch	Ereignisse bezüglich Orts- und Zustandsänderungen der Objekte	Ereignisse bezüglich Änderungen der Flussraten und des Auftretens von Impulsen	Ereignisse bezüglich Änderungen der Flussraten	Voranschreiten der Simulationszeit
Zeitschritt	Variabel	Variabel	Variabel	Konstant

## 4.4 Mesoskopisches Produktmodell

Das Produktmodell eines Simulationsansatzes beschreibt die Möglichkeiten, die ein Simulationsansatz für die Abbildung logistischer Flussobjekte bietet. Die in Abschnitt 4.2 und 4.3 beschriebenen Prozessmodelle der Simulationsansätze bilden die Grundlage für die jeweiligen Produktmodelle. Durch das Prozessmodell wird bereits festgelegt, wie genau das Produktmodell eines Simulationsansatzes sein kann.

Mikroskopische Modelle der ereignisdiskreten Simulation arbeiten mit impulsförmigen Flussprozessen. Deshalb können diese Modelle einzelne Flussobjekte abbilden und beliebig detailliert sein. In flussorientierten System-Dynamics-Modellen und Discrete-Rate-Modellen wird der Fluss zwischen zwei Modellelementen auf aggregierter Ebene mit einer Variablen beschrieben. Eine Betrachtung verschiedener logistischer Flussobjekttypen innerhalb eines Flusses ist hier nicht mehr möglich.

Der mesoskopische Ansatz kombiniert die flussratenbasierte Abbildung mit der flussobjektbasierten Abbildung. Somit bietet der mesoskopische Ansatz generell alle Voraussetzungen für sowohl eine sehr genaue als auch eine aggregierte Abbildung logistischer Flussobjekte. Aus mesoskopischer Sicht auf das zu modellierende Problem ist es erstrebenswert, logistische Flussobjekte hauptsächlich mit stückweise konstanten Flussraten abzubilden, um die damit verbundenen Vorteile der schnellen Modellberechnung zu nutzen. Die flussratenbasierte Darstellung der Discrete-Rate-Modelle, auf der der mesoskopische Ansatz basiert, ist jedoch für viele praktische Fragestellungen bei der Planung und Analyse logistischer Flusssysteme zu ungenau, da hiermit nur sogenannte Einproduktmodelle abgebildet werden können.

Deshalb soll das Produktmodell der Discrete-Rate-Simulation für den mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatz um Produkttypen und Produktportionen erweitert werden. Die grundlegenden Ideen dazu wurden bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben. Das mesoskopische Produktmodell kann innerhalb eines Flusses zeitlich parallel eine Unterscheidung verschiedener Produkttypen und innerhalb eines Produkttyps zeitlich sequentiell und parallel von verschiedenen Produktportionen abbilden, um trotz einer flussbasierten Darstellung der logistischen Objektflüsse eine höhere Abbildungsgenauigkeit zu erreichen.

Steuerungen können somit produkttyp- oder produktportionsabhängig umgesetzt werden, wenn sich beispielsweise die Bearbeitungszeit zweier Produkttypen an einer Resource voneinander unterscheidet. Durch die Einführung von Produktportionen können beispielsweise Produktionslose, Aufträge, Chargen oder Gruppen von Personen im gesamten Modell verfolgt werden.

Abbildung 4.10 zeigt die Unterscheidung verschiedener Produkttypen innerhalb eines Flusses und die Unterscheidung verschiedener Produktportionen innerhalb eines Produkttyps an einem Knoten eines logistischen Netzwerkes. Es ist zu erkennen, dass impulsförmig-

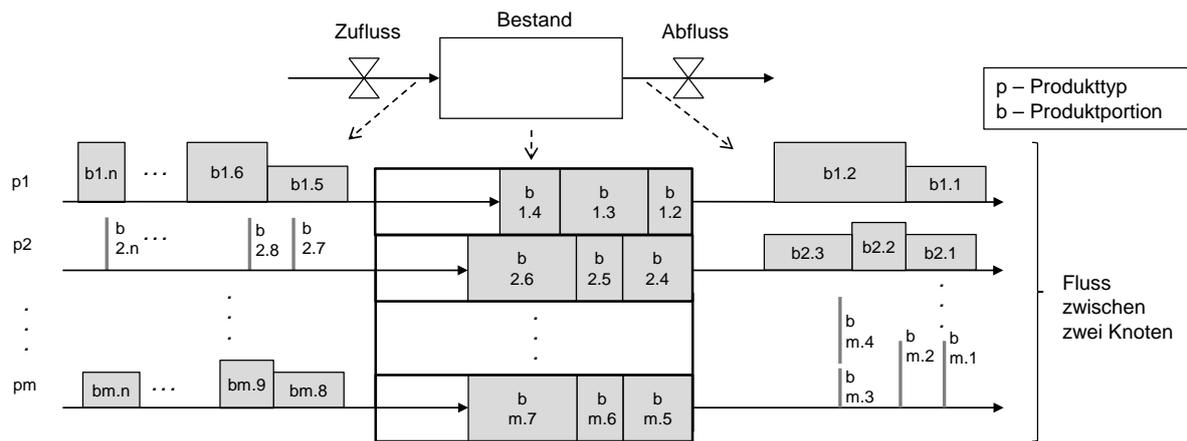


Abbildung 4.10: Mesoskopisches Produktmodell

ge Objektflüsse die Impulseigenschaft verlieren, wenn sie in den Bestand eines Knotens des Netzwerks übergehen. Am Ausgang des Netzwerkknotens ist jedoch wiederum eine Umwandlung des Bestandes in Impulse möglich. Solange sich der Fluss eines Produkttyps nicht verzweigt, können sich Produktportionen nicht überholen. Auf das Verzweigen der Flüsse eines Produkttyps und der damit verbundenen Änderung der Reihenfolge der Produktportionen wird in Abschnitt 4.6 eingegangen.

## Produkttypen

Um trotz einer flussbasierten Modellierung eine höhere Abbildungsgenauigkeit bezüglich logistischer Flussobjekte zu erreichen, besteht die Möglichkeit, zeitlich parallel in allen Strukturelementen eines Modells durchgehend zwischen verschiedenen Produkttypen zu unterscheiden. Im Weiteren werden alle logistischen Flussobjekte als Produkte bezeichnet. Die Einführung von Produkttypen bedeutet, dass der Fluss zwischen zwei Modellelementen nicht mehr nur mit einer Variablen dargestellt wird, sondern mit soviel Variablen, wie es Produkttypen gibt. Das zeitlich parallele Auftreten unterschiedlicher Produkttypen wird im Modell über die Kanäle der Modellbausteine abgebildet. Ein Modellbaustein hat soviel Kanäle, wie Produkttypen durch ihn fließen.

Die Anzahl der Produkttypen, die Prinzipien der Zuordnung realer logistischer Objekte zu einem Produkttyp und die Möglichkeiten der Umwandlung von Produkttypen müssen in der Phase der konzeptionellen Modellierung festgelegt werden. Die Entscheidung muss der Modellierer anhand der Modellierungs- und Simulationsziele und der damit einhergehenden notwendigen Abbildungsgenauigkeit treffen. Über die Anzahl der definierten Produkttypen kann die Abbildungsgenauigkeit des Modells beeinflusst werden.

Nach [Forrester 1961, S. 110] geben die Entscheidungsfunktionen, die die Flussraten steuern, den besten Hinweis darauf, was eine zulässige Aggregation der Flussobjekte ist. Eine Aggregation ist zulässig,

- wenn die Flussobjekte durch die gleiche Entscheidungsfunktion gesteuert werden und
- wenn die gesteuerten Outputflüsse an einer anderen Stelle im Modell für einen identischen Zweck benutzt werden.

Das bedeutet, dass insbesondere folgende Eigenschaften logistischer Flussobjekte für eine Zuordnung zu Produkttypen ausschlaggebend sind:

- Ressourcenverbrauch für die Operationen an den logistischen Flussobjekten.
- Welche Ressourcen werden für die Operationen an den logistischen Flussobjekten benötigt?
- Ziel der logistischen Flussobjekte.

### **Produktportionen**

Produktportionen können sowohl Fragmenten von ratenbasierten Flüssen als auch Impulsen zugeordnet werden, wie in Abbildung 4.10 dargestellt ist. Eine Produktportion wird durch ihre ID und Zugehörigkeit zu einem Produkttyp gekennzeichnet und beinhaltet eine bestimmte Menge an logistischen Flussobjekten.

Das Ziel mesoskopischer Modelle ist eine schnelle Modellierung und Simulation. Deswegen ist es anzustreben, nur so wenig verschiedene Produkttypen und Produktportionen wie möglich zu nutzen, damit der Performance-Vorteil der flussbasierten Modellierung mit stückweise konstanten Flussraten nicht verloren geht.

Auf das Verhalten des mesoskopischen Produktmodells mit seinen Produkttypen und Produktportionen an den einzelnen Modellelementen wird in Abschnitt 4.6 bei der Beschreibung der mesoskopischen Modellelemente eingegangen. Die Möglichkeiten zur Umwandlung von Produkttypen und zur Bildung von Produktportionen werden ebenfalls in Abschnitt 4.6 beschrieben.

## 4.5 Mesoskopischer Simulationsmechanismus

Der mesoskopische Modellierungs- und Simulationsansatz bildet die Zustandsänderungen des modellierten Logistiksystems im Zeitverlauf auf Basis eines ereignisorientierten Vorgehens ab. Abschnitt 4.5.1 geht deshalb zuerst auf die verschiedenen Arten von Ereignissen in mesoskopischen Modellen ein. Anschließend beschreibt Abschnitt 4.5.2 den Simulationsalgorithmus mesoskopischer Modelle.

### 4.5.1 Ereignisse

Die Darstellung von Flussprozessen in mesoskopischen Simulationsmodellen beruht auf der Neuberechnung des Systemzustands auf Basis variabler Zeitschritte. Die Größe der variablen Zeitschritte wird durch die Eintrittszeitpunkte von Ereignissen bestimmt. Während eines variablen Zeitschritts sind in einem mesoskopischen Modell alle Modellvariablen konstant, die die Flussprozesse und deren Steuerung beschreiben. Nur die aus den stückweise konstanten Flussgrößen resultierenden Bestandsgrößen haben während eines variablen Zeitschritts einen linearen Verlauf. Ereignisse betreffen Änderungen der im Zeitverlauf stückweise konstanten Modellvariablen. Der neue Zustand der Bestandsgrößen kann zu jedem Ereigniszeitpunkt durch ihre lineare Entwicklung berechnet werden.

Aufgrund der zusätzlichen Möglichkeit, Flüsse durch zeitlose Impulse zu beschreiben, können sich die Bestandsgrößen zu den Zeitpunkten dieser Impulse sprunghaft ändern. Das Auftreten eines Impulses ist immer mit einem Ereignis verbunden.

Zu einem Ereignis gehören die Logik, die zum Eintritt des Ereignisses führt, und die resultierenden Zustandsänderungen (vgl. [Kramer u. Neculau 1998, S.78]. In den hier beschriebenen mesoskopischen Simulationsmodellen können die durch Ereignisse ausgelösten Zustandsänderungen sowohl die den Flussprozess beschreibenden Variablen (Flussintensitäten) als auch die den Flussprozess steuernden Variablen (Steuerungsvariablen) betreffen.

Anhand der Logik, die zum Eintreten eines Ereignisses führt, kann in mesoskopischen Modellen zwischen vordefinierten, steuerungsbedingten und modellimmanenten Ereignissen unterschieden werden (siehe Abbildung 4.11):

- **Vordefinierte Ereignisse**

Vordefinierte Ereignisse betreffen die vorab durch den Nutzer definierten zeitabhängigen Verläufe sowohl der den Flussprozess beschreibenden Variablen (stückweise konstante Flussintensitäten und impulsförmige Flüsse) als auch der den Flussprozess steuernden Variablen (stückweise konstante Steuerungsvariablen). Jede vorab definierte Änderung dieser Größen führt zum Eintritt eines Ereignisses. Das Eintreten vordefinierter Ereignisse ist nur von der Simulationszeit abhängig. Der Nutzer kann die Änderungen von Modellvariablen in Form von Zeitreihen vor Beginn der Si-

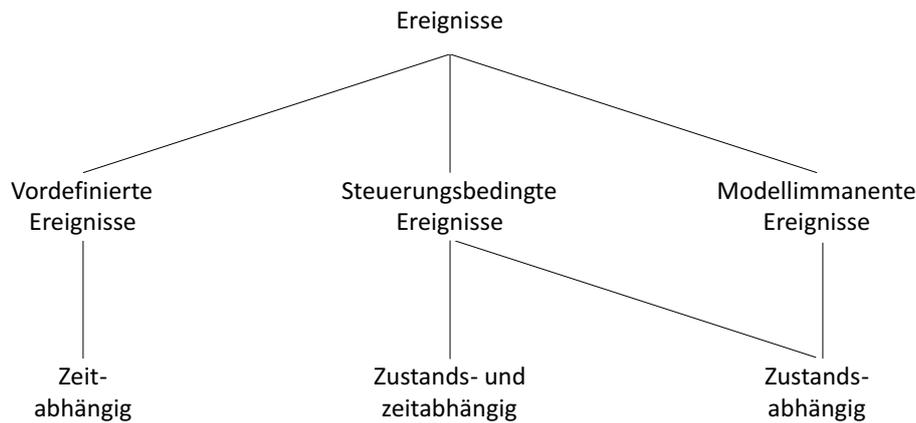


Abbildung 4.11: Ereignisse

mulation festlegen. Vordefinierte Ereignisse können weiterhin für die Definition von Zeitpunkten für die Protokollierung des Systemzustands genutzt werden.

Beispiele für vordefinierte Ereignisse sind:

- Änderungen der an den Quellen in das System eintretenden Systemlasten,
- Änderungen der Grenzleistungen der Ressourcen des modellierten Netzwerks beispielsweise aufgrund eines festen Schichtmodells,
- Definitionen von Transportbewegungen zu festgelegten Zeiten wie beispielsweise Milkruns,
- Änderungen des Routings der Objektflüsse und
- Definitionen von Zeitpunkten für die Protokollierung von Systemzuständen.

#### • Steuerungsbedingte Ereignisse

Steuerungsbedingte Ereignisse bilden die Steuerung der Flussprozesse ab. Die Steuerung kann beispielsweise die Ressourcenverteilung im Logistiksystem oder das Routing der logistischen Flüsse durch das modellierte System betreffen.

Steuerungsbedingte Ereignisse treten dann auf, wenn durch den Nutzer definierte Bedingungen eintreten. Die Logik, die das Eintreten eines Ereignisses beschreibt, kann aus mehreren beliebigen Bedingungen bestehen, die durch den Modellierer formuliert werden. Mit dem Ereignis sind frei durch den Nutzer definierbare Aktionen verbunden, wie beispielsweise die Änderung der zur Verfügung stehenden Ressourcennmengen an einem Arbeitsbereich für einen bestimmten Produkttyp. Steuerungsbedingte Ereignisse können auch abhängig von zukünftig zu erwartenden Werten sein, da die Flussgrößen während eines variablen Zeitschritts stückweise konstant sind.

Steuerungsbedingte Ereignisse können anhand der ereignisauslösenden Bedingungen wie folgt unterteilt werden:

– *Zustandsabhängige steuerungsbedingte Ereignisse*

Bei zustandsabhängigen steuerungsbedingten Ereignissen hängt der Ereigniszeitpunkt nur vom Systemzustand ab. Typisch für zustandsabhängige steuerungsbedingte Ereignisse in mesoskopischen Modellen sind das Über- oder Unterschreiten von definierten Bestandshöhen oder das Erreichen von definierten Flussmengen an den Modellelementen. Beispielsweise kann so die Abfahrt eines LKW gesteuert werden, wenn im Warenausgang die entsprechende Anzahl an zu versendenden Gütern erreicht ist.

– *Zustands- und zeitabhängige steuerungsbedingte Ereignisse*

Bei zustands- und zeitabhängigen Ereignissen müssen zu einem definierten Simulationszeitpunkt die definierten Bedingungen erfüllt sein, damit das Ereignis eintritt. Typisch dafür sind periodische zustandsabhängige Steuerungen, die im Modell implementiert werden.

• **Modellimmanente Ereignisse**

Modellimmanente Ereignisse treten aufgrund der mesoskopischen Simulationsmechanismen auf und werden automatisch erkannt. Der Nutzer muss sich um diese Ereignisse nicht kümmern.

Zu den modellimmanenten Ereignissen gehören unter anderem folgende Ereignisse:

- Der Bestand eines Trichters wird Null. Wird der Bestand eines Trichters Null und ist die Inputflussrate  $\lambda_{in}$  des Trichters kleiner als die Grenzleistung  $\mu$  des Trichters, dann ändert sich die Outputflussrate  $\lambda_{out}$  des Trichters. Der Trichter als mesoskopisches Modellelement wird in Abschnitt 4.6.2 beschrieben. Er umfasst die Funktionen der aus System-Dynamics- und Discrete-Rate-Modellen bekannten Behälter und Ventile.
- Der Ausgangsfluss an einem Verzögerungselement beginnt oder endet. Das Verzögerungselement als mesoskopisches Modellelement wird in Abschnitt 4.6.5 beschrieben.
- Der Beginn oder das Ende einer Produktportion, die im Eingangs- oder Ausgangsfluss einer Strukturkomponente erfasst wird, ist erreicht.

## 4.5.2 Simulationsalgorithmus

In diesem Abschnitt wird zuerst der gesamte Ablauf der mesoskopischen Simulation und anschließend die Berechnung der Variablen an den Modellelementen beschrieben.

### Gesamtalgorithmus

Der Simulationsalgorithmus in mesoskopischen Modellen ist in Abbildung 4.12 dargestellt und wird nachfolgend beschrieben:

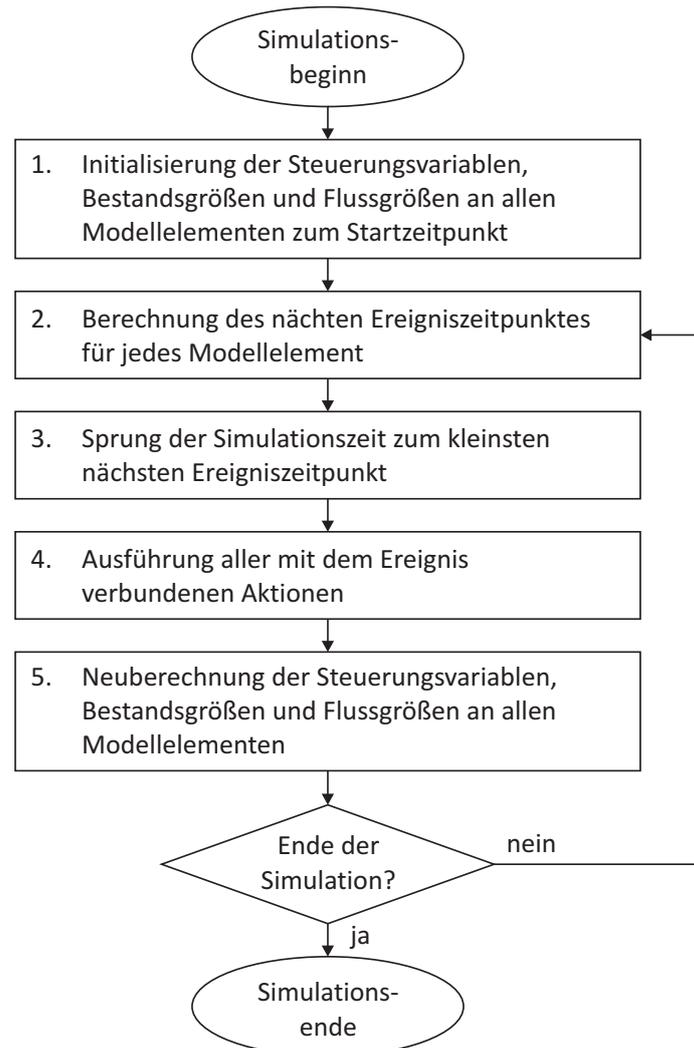


Abbildung 4.12: Ablauf der mesoskopischen Simulation

1. Zu Beginn der Simulation zum Zeitpunkt  $t_i = t_0$  erfolgt eine Initialisierung aller Modellelemente  $e$  ( $e = 1, \dots, m$ ) mit ihren Anfangsbeständen  $S^e(t_0)$ , Inputflussraten  $\lambda_{in}^e(t_0)$ , ihren Steuerungsvariablen  $SV^e(t_0)$  und ihren Outputflussraten  $\lambda_{out}^e(t_0)$ .

Die Initialisierung erfolgt sequentiell in Reihenfolge der aufsteigenden Modellelementnummer  $e$ . Die Flussraten und Steuerungsvariablen zum Zeitpunkt  $t_i = t_0$  gelten bis zum Eintreten eines Ereignisses zum Zeitpunkt  $t_{i+1} = t_1$ , d. h. für den gesamten variablen Zeitschritt  $[t_0, t_1]$ .

2. Für jedes Modellelement  $e$  wird der nächste Ereigniszeitpunkt  $t_{i+1}^e$  bestimmt.
3. Die Simulationszeit springt zum kleinsten nächsten Ereigniszeitpunkt  $t_i := t_{i+1} = \min \{t_{i+1}^e \mid e = 1, \dots, m\}$ .
4. Alle mit diesem Ereignis verbundenen Aktionen werden ausgeführt. Das kann beispielsweise die Änderung von Steuerungsvariablen (z. B. die Änderung der Grenzleistung einer Ressource) oder die Änderung der Systemlast an den Quellen betreffen.
5. Für den neuen Zeitpunkt  $t_i$  werden für alle Modellelemente  $e$  die Bestände  $S^e(t_i)$ , die Inputflussraten  $\lambda_{in}^e(t_i)$ , die Steuerungsvariablen  $SV^e(t_i)$  und die Outputflussraten  $\lambda_{out}^e(t_i)$  berechnet. Die Berechnung erfolgt wie im ersten Schritt sequentiell für alle Modellelemente in Reihenfolge der aufsteigenden Modellelementnummer  $e$ . Die Flussraten und Steuerungsvariablen zum Zeitpunkt  $t_i$  gelten für den gesamten variablen Zeitschritt  $[t_i, t_{i+1}]$ , bis das nächste Ereignis eintritt.

Wenn das Ende der Simulationszeit noch nicht erreicht ist, wird zum zweiten Schritt zurückgesprungen und mit der Bestimmung des nächsten Ereigniszeitpunkts fortgefahren.

### Algorithmus zur Berechnung der Modellvariablen an den Modellelementen

Nachfolgend wird der Algorithmus zur Berechnung der Fluss- und Bestandsgrößen an den Modellelementen (siehe Abbildung 4.13) beschrieben. Auch die Initialisierung zu Beginn einer Simulation erfolgt nach der hier beschriebenen Vorgehensweise.

Die Werte für die Fluss- und Bestandsgrößen der Flussprozesse an einem Modellelement werden zu jedem Simulationszeitpunkt neu berechnet. Die Simulationszeitpunkte, an denen der Systemzustand neu berechnet wird, werden dynamisch durch das Eintreten von Ereignissen bestimmt beziehungsweise bereits in der Modellierungsphase durch die Vorabdefinition von Prozessen festgelegt (siehe Abschnitt 4.5.1).

Dem mesoskopischen Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass alle Variablen zur Steuerung der Flussprozesse an den Modellelementen und alle daraus resultierenden Flussraten zum Zeitpunkt  $t_i$  während des variablen Simulationszeitintervalls  $[t_i, t_{i+1}]$  konstant sind und für das gesamte Intervall gelten. Die einzigen Größen, die sich während eines Zeitschritts ändern, sind die Bestände und die kumulierten Flüsse. Sie haben aufgrund der stückweise konstanten Flussraten einen linearen Verlauf. Sie werden jedoch nicht kontinuierlich mit kleinen Zeitschritten, sondern nur zu den durch Ereignisse oder vorab definierte

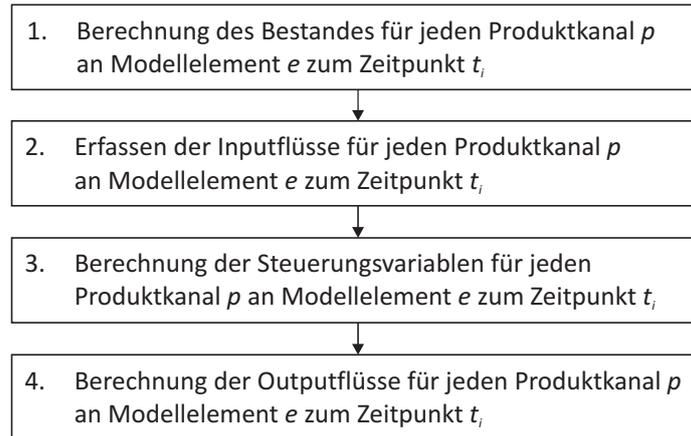


Abbildung 4.13: Ablauf der Berechnung der Modellvariablen an einem Modellelement

Prozesse ausgelösten Simulationszeitpunkten neu berechnet.

Die Berechnung erfolgt dabei sequentiell von den Quellen in Richtung der Senken in Reihenfolge der aufsteigenden Modellelementnummer  $e$ , da die Berechnung an einem Modellelement erst dann erfolgen kann, wenn alle Vorgängermodellelemente berechnet wurden. Die allgemeine Berechnungsreihenfolge an einem Modellelement ist in Abbildung 4.13 dargestellt und wird nachfolgend beschrieben. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die speziellen Berechnungen an den verschiedenen mesoskopischen Modellelementen eingegangen. Die mesoskopischen Modellelemente selbst werden in Abschnitt 4.6 beschrieben.

1. **Berechnung des Bestandes** für jeden Produktkanal  $p$  an Modellelement  $e$  zum Zeitpunkt  $t_i$ . Bei den Montage- und Demontageelementen erfolgt die Bestandsberechnung für die vorgeschalteten Trichter, da die Montage- und Demontageelemente selbst keinen Bestand aufnehmen können
2. **Erfassen der Inputflüsse** für jeden Produktkanal  $p$  an Modellelement  $e$  zum Zeitpunkt  $t_i$ . Die berechneten Größen gelten für den gesamten variablen Zeitschritt  $[t_i, t_{i+1}]$ , bis das nächste Ereignis zum Zeitpunkt  $t_{i+1}$  eintritt.
3. **Berechnung der Steuerungsvariablen** für jeden Produktkanal  $p$  an Modellelement  $e$  zum Zeitpunkt  $t_i$ . Die berechneten Größen gelten für den gesamten variablen Zeitschritt  $[t_i, t_{i+1}]$ , bis das nächste Ereignis zum Zeitpunkt  $t_{i+1}$  eintritt.
4. **Berechnung der Outputflüsse** für jeden Produktkanal  $p$  an Modellelement  $e$  zum Zeitpunkt  $t_i$ . Die berechneten Größen gelten für den gesamten variablen Zeitschritt  $[t_i, t_{i+1}]$ , bis das nächste Ereignis zum Zeitpunkt  $t_{i+1}$  eintritt.

Die Bestands- und Flussgrößen an den Modellelementen können sowohl aggregiert über alle Produkttypen (Modellelementkanäle), Vorgänger- und Nachfolgerelemente als auch

für einzelne Produkttypen (Trichterkanäle), Vorgänger- und Nachfolgerelemente abgefragt werden, um sie für eine zustandsabhängige Steuerung der Flüsse an den Modellelementen oder zur Ergebnisdarstellung zu nutzen.

## 4.6 Mesoskopische Modellelemente

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Modellelemente, ihre Möglichkeiten zur Steuerung der Flussprozesse und die Berechnung der Fluss- und Bestandsgrößen an ihnen beschrieben.

### 4.6.1 Modellelemente im Überblick

Bei der Beschreibung von Produktions- und Logistiksystemen können die Grundfunktionen Transformieren, Speichern und Transportieren unterschieden werden, die in Tabelle 4.2 erläutert sind. Eine weitere Untergliederung der Grundfunktionen mit Beispielen findet sich bei [Schenk u. Wirth 2004, S. 84].

Mit Hilfe der in Tabelle 4.3 aufgeführten mesoskopischen Modellelemente können die Grundfunktionen Transformieren, Speichern und Transportieren in Produktions- und Logistiksystemen abgebildet werden. Die Modellelemente bilden die Struktur des logistischen Netzwerks und die Steuerung der darin ablaufenden Flussprozesse ab. Modellelemente nehmen Flüsse von den vorhergehenden Modellelementen auf und geben sie an die nachfolgenden Modellelemente weiter. Eine Transformation der logistischen Flüsse kann mit dem Trichter, den Montage- und den Demontageelementen erfolgen. Die Modellelemente Trichter und Verzögerung können Flüsse speichern. Transporte können mit den Verzögerungselementen abgebildet werden.

Tabelle 4.2: Grundfunktionen der Flüsse und Prozesse [Schenk u. Wirth 2004, S. 82]

Bezeichnung	Definition
Transformieren	Verändern - „Wandeln“ - von Eigenschaften des Flussgegenstandes zum Zwecke der Erfüllung einer Prozessaufgabe.
Speichern	„Aufbewahren“ des Flussgegenstandes zum Zwecke seiner Bevorratung bzw. Bereitstellung im Rahmen einer Prozessaufgabe.
Transportieren	„Überwechseln“ und/oder „Befördern“ des Flussgegenstandes zwischen zwei aufeinander folgenden Einrichtungen des Transformierens und/oder Speichern und/oder Transportieren.

Tabelle 4.3: Modellelemente

Modellelement	Symbol	Kurzbeschreibung
Quelle		Systemgrenze
Trichter		Hauptstrukturelement Abbildung von Prozessen an Ressourcen (z. B. Bearbeitungs-, Prüf-, Handhabe-, Lager-, Sammel-, Sortier- und Verteilprozesse)
Montage		Zusammenführung von Produktflüssen verschiedener Produkttypen zu einem Produktfluss mit neuem Produkttyp (z. B. Montage-, Verpackungs- und Kommissionierprozesse)
Demontage		Splitten eines Produktflusses in Produktflüsse mit neuen Produkttypen (z. B. Demontage- und Vereinzelungsprozesse)
Verzögerung		Abbildung von Zeitverzögerungen an Flüssen (z. B. Transport- und Liegezeiten)
Senke		Systemgrenze

## 4.6.2 Trichter (T)

Das Modellelement Trichter ist die Hauptstrukturkomponente des mesoskopischen Simulationsansatzes [Reggelin 2008]. Ein Trichter dient zur Abbildung von Prozessen an Ressourcen des zu modellierenden Systems. Er kann somit die in Abbildung 4.14 dargestellten Transformationsprozesse abbilden. In Verbindung mit den Montage- und Demontageelementen (siehe Abschnitte 4.6.3 und 4.6.4) können an einem Trichter zusätzlich Transformationen der logistischen Flüsse abgebildet werden, in denen sich der Produkttyp aufgrund des Zusammenfließens mehrerer Produkttypen (z. B. bei Montageprozessen) oder aufgrund des Aufsplittens eines Produkttyps (z. B. bei Demontageprozessen) ändert.

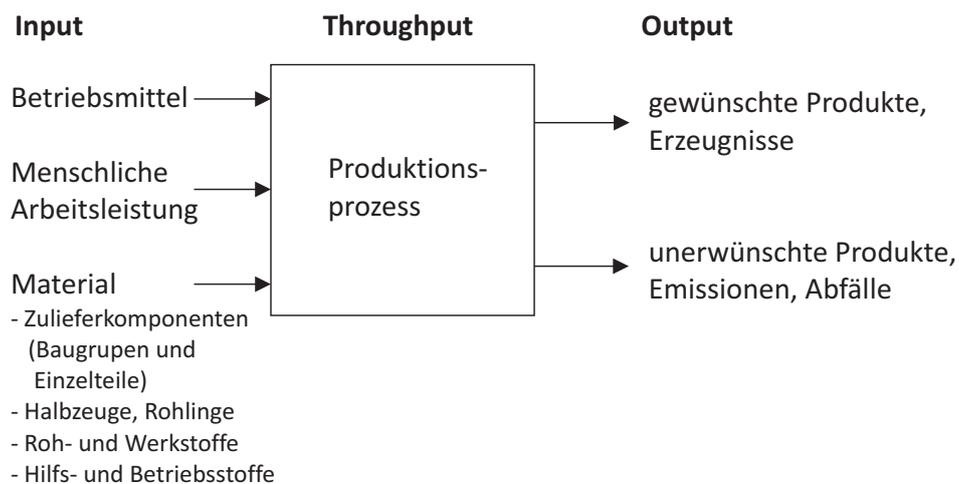


Abbildung 4.14: Der Produktionsprozess als Transformationsprozess [Schenk u. Wirth 2004, S. 56]

Der Trichter ist abgeleitet aus den System-Dynamics-Modellelementen Behälter und Ventil (siehe Abbildung 4.15). Die Bezeichnung Trichter wurde gewählt, da die Trichter-analogie im Bereich Produktion und Logistik insbesondere durch die Arbeiten von [Bechte 1984] und [Wiendahl 1997] geläufig ist. Ein Trichter ist durch seine Grenzleistung  $\mu$  charakterisiert, die den Fluss durch den Trichter steuert. Ist der Inputfluss  $\lambda_{in}$  größer als die Grenzleistung  $\mu$ , so baut sich im Trichter ein Bestand  $S$  auf.

Da das mesoskopische Produktmodell parallel mit mehreren Produkttypen operieren kann, kann ein Trichter mehrere parallele Kanäle besitzen. Für jeden durchfließenden Produkttyp besitzt der Trichter einen Kanal. Jeder Kanal eines Trichters kann einzeln gesteuert werden. Abbildung 4.16 zeigt einen mehrkanaligen Trichter mit seinen Eingangs-, Bestands- und Ausgangsvariablen (in der Abbildung rechts) sowie Steuerungsvariablen (in der Abbildung links).

Die Bildung der Ausgangsströme an den Trichtern ist nicht mit einer Zeitverzögerung verbunden. Verzögerungen an einem Trichterkanal entstehen nur, wenn die Inputflussrate größer als die Grenzleistung ist und sich Bestände im Trichterkanal aufbauen oder wenn

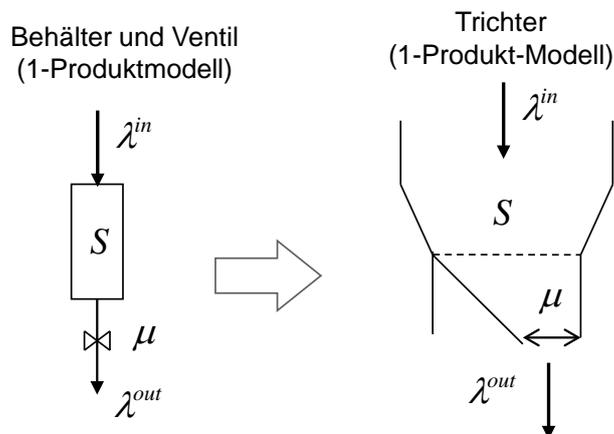


Abbildung 4.15: Ableitung des Modellelements Trichter

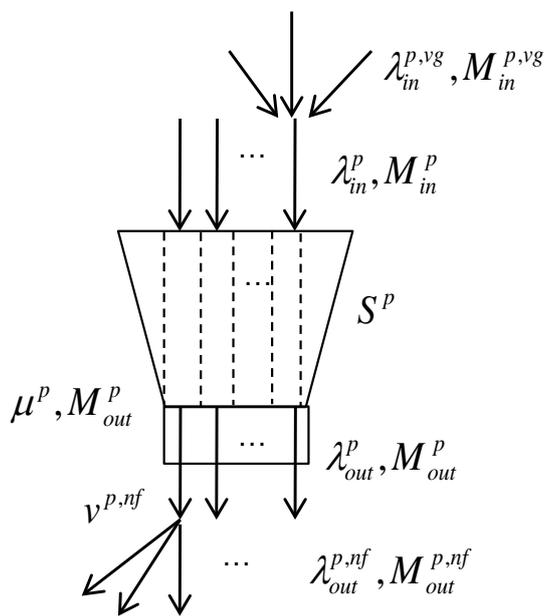


Abbildung 4.16: Modellelement Trichter

die Grenzleistung auf Null gesetzt wird. Für die explizite Abbildung von Verzögerungen kann das Verzögerungselement (siehe Abschnitt 4.6.5) genutzt werden.

Der maximal mögliche Bestand für den gesamten Trichter beziehungsweise für einen Trichterkanal kann nicht als Parameter in der Steuerung festgelegt werden, da diese Beschränkung zu nicht eindeutigen Situationen bei der Steuerung der vorgelagerten Modellkomponenten führen kann. Der Modellierer kann jedoch selbst ein Ereignis mit der Bedingung „Bestand im Trichterkanal erreicht einen definierten Wert“ und einer damit verbundenen Änderung der Steuerungen der Vorgänger-Modellelemente definieren.

Der Zustand der abgebildeten Flussprozesse an einem Trichter wird durch die in Tabelle 4.4 aufgeführten Bestands- und Flussgrößen beschrieben. Weiterhin sind in der Tabelle die Variablen aufgeführt, über die der Trichter die Flüsse steuern kann.

### Flüsse und Impulse an einem Trichter

Der in den Kanal eines Trichters einfließende Produktfluss wird nach dem FIFO Prinzip behandelt. Diese Eigenschaft ist nur relevant, wenn innerhalb eines Produkttyps verschiedene Produktportionen definiert sind. Ein Überholen verschiedener Produktportionen in einem Kanal eines Trichters ist somit nicht möglich.

Impulse werden im Trichter zu Bestand und verlieren ihre Impulseigenschaft (siehe Abbildung 4.17). Abstände zwischen Impulsen und Flüssen gehen in einem Trichter ebenfalls verloren. Über nutzerdefinierte Ereignisse können wiederum zeitlose Impulse am Trichterausgang ausgelöst werden. Der Bestand des Trichters wird dann zum Ereigniszeitpunkt um die Menge des ausgelösten Impulses reduziert.

### Berechnung der Fluss- und Bestandsgrößen

#### 1. Bestand

Der Bestand eines Trichterkanals zum Zeitpunkt  $t_i$  errechnet sich folgendermaßen aus den Flussraten des vorherigen Zeitschritts, der Größe des Zeitschritts und Impulsen zum Ereigniszeitpunkt:

$$S^p(t_i) = S^p(t_{i-1}) + (\lambda_{in}^p(t_{i-1}) - \lambda_{out}^p(t_{i-1})) \cdot (t_i - t_{i-1}) + M_{in}^p(t_i) - M_{out}^p(t_i). \quad (4.23)$$

#### 2. Inputfluss

Die Intensität des Inputflusses beziehungsweise die Größe eines Inputimpulses an einem Trichterkanal ergibt sich aus der Summe der Intensitäten aller Outputflüsse beziehungsweise Outputimpulse der Vorgängerelemente, die diesen Trichterkanal als Ziel haben:

$$\lambda_{in}^p(t_i) = \sum_{VG} \lambda_{out}^{p,vg}(t_i), \quad (4.24)$$

Tabelle 4.4: Modellvariablen an einem Trichter

Bestand	$S^p(t_i)$	Bestand für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Bestand	$S(t_i)$	Bestand über alle Produkttypen (Trichterkanäle) zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$\lambda_{in}^{p,vg}(t_i)$	Intensität des Inputflusses für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ vom Vorgänger $vg$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$\lambda_{in}^p(t_i)$	Intensität des Inputflusses für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$\lambda_{in}(t_i)$	gesamte Intensität des Inputflusses über alle Produkttypen (Trichterkanäle) für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$C_{in}^{p,vg}(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ vom Vorgänger $vg$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$C_{in}^p(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$C_{in}(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge über alle Produkttypen (Trichterkanäle) im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$M_{in}^{p,vg}(t_i)$	Menge eines Inputimpulses für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ vom Vorgänger $vg$ zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$M_{in}^p(t_i)$	Menge eines Inputimpulses für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$M_{in}(t_i)$	Menge eines Inputimpulses über alle Produkttypen (Trichterkanäle) zum Zeitpunkt $t_i$
Steuerung	$\mu^p(t_i)$	Grenzleistung für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$M_{out}^p(t_i)$	Menge eines Outputimpulses für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Steuerung	$v^{p,nf}(t_i)$	Verteilung des Outputflusses bzw. -impulses für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ an das nachfolgende Modellelement $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}(t_i)$	Intensität des Outputflusses über alle Produkttypen (Trichterkanäle) für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}^p(t_i)$	Intensität des Outputflusses für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}^{p,nf}(t_i)$	Intensität des Outputflusses für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ zum Nachfolger $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$C_{out}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge über alle Produkttypen (Trichterkanäle) im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$C_{out}^p(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$C_{out}^{p,nf}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ zum Nachfolger $nf$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$M_{out}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses über alle Produkttypen (Trichterkanäle) zum Zeitpunkt $t_i$
Output	$M_{out}^p(t_i)$	Menge eines Outputimpulses für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Output	$M_{out}^{p,nf}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses für Produkttyp (Trichterkanal) $p$ zum Nachfolger $nf$ zum Zeitpunkt $t_i$

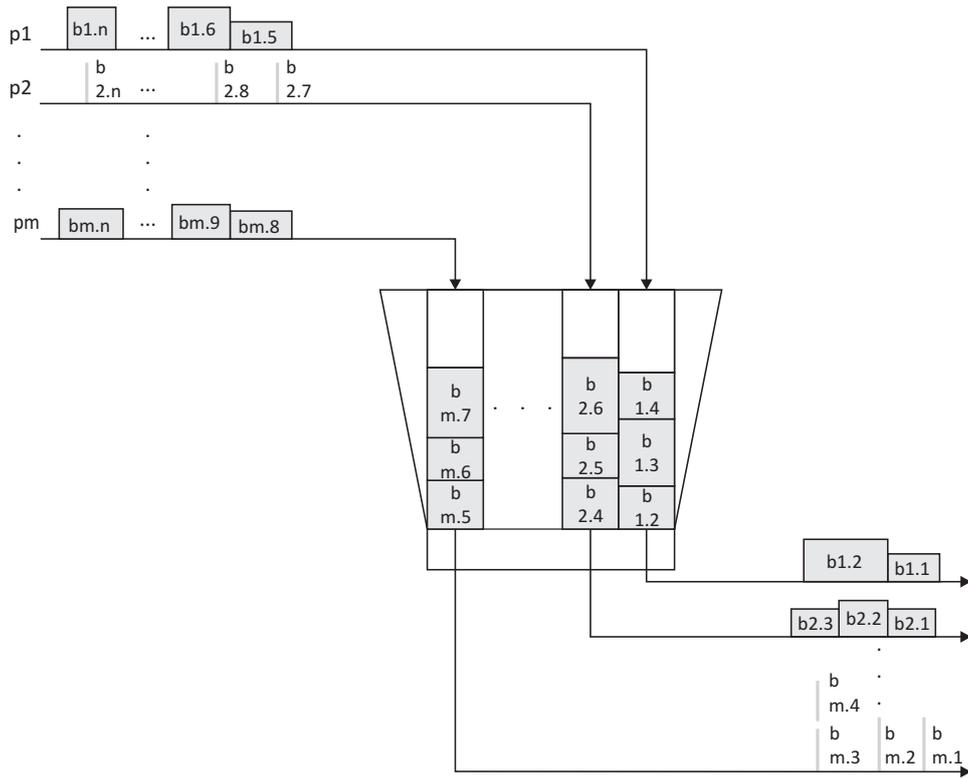


Abbildung 4.17: Verhalten des Produktmodells am Trichter

$$M_{in}^p(t_i) = \sum_{VG} M_{out}^{p,v,g}(t_i). \quad (4.25)$$

Die Aufsummierung der ankommenden Impulse ist hier aus Gründen der Übersichtlichkeit erst im zweiten Schritt dargestellt, muss jedoch schon bei der Bestandsberechnung erfolgen.

### 3. Steuerungsvariablen

Die Änderung der Steuerungsvariablen ist immer mit einem vordefinierten oder steuerungsbedingten Ereignis verbunden. Die Steuerung der Flüsse an einem Trichterkanal kann durch die Grenzleistung  $\mu^p$ , durch das Auslösen eines zeitlosen Impulses  $M_{out}^p$  und über die Verteilung des Outputflusses auf verschiedene nachfolgende Modellelemente  $v^{p,nf}$  erfolgen. Die Steuerungsvariablen können abhängig von den zukünftig zu erwartenden Systemlasten sein, da alle Flussraten während eines Zeitschritts konstant sind. Es können beliebige nutzerdefinierte Formeln zur Bestimmung der Steuerungsvariablen verwendet werden.

### 4. Outputfluss

In Abhängigkeit von der festgelegten Grenzleistung des Trichterkanals  $\mu^p(t_i)$  und des Anfangsbestands des Trichterkanals  $S^p(t_i)$  kann nun die Outputflussrate für diesen

Trichterkanal  $\lambda_{out}^p(t_i)$  ermittelt werden:

$$\lambda_{out}^p(t_i) = \begin{cases} \lambda_{in}^p(t_i), & \text{wenn } S^p(t_i) = 0 \text{ und } \lambda_{in}^p(t_i) \leq \mu^p(t_i), \\ \mu^p(t_i), & \text{wenn } S^p(t_i) > 0 \text{ oder } \lambda_{in}^p(t_i) \geq \mu^p(t_i). \end{cases} \quad (4.26)$$

Für den Fall, dass der Outputfluss  $\lambda_{out}^p(t_i)$  bzw. Outputimpuls  $M_{out}^p(t_i)$  eines Trichterkanals auf mehrere nachfolgende Modellelemente verteilt wird, errechnet sich der entsprechende Anteil wie folgt:

$$\begin{aligned} \lambda_{out}^{p,nf}(t_i) &= \lambda_{out}^p(t_i) \cdot v^{p,nf}(t_i) \text{ bzw.} \\ M_{out}^{p,nf}(t_i) &= M_{out}^p(t_i) \cdot v^{p,nf}(t_i). \end{aligned} \quad (4.27)$$

Dabei gelten:

$$\begin{aligned} \sum_{NF} \lambda_{out}^{p,nf}(t_i) &= \lambda_{out}^p(t_i) \text{ bzw.} \\ \sum_{NF} M_{out}^{p,nf}(t_i) &= M_{out}^p(t_i) \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$\sum_{NF} v^{p,nf}(t_i) = 1. \quad (4.29)$$

Die kumulierten Flussmengen in einem Simulationszeitschritt lassen sich aus den Flussintensitäten und der Größe des variablen Zeitschritts berechnen:

$$\begin{aligned} C_{in}^{p,vg}(t_{i-1}, t_i) &= \lambda_{in}^{p,vg}(t_{i-1}) \cdot (t_i - t_{i-1}) \text{ und} \\ C_{out}^{p,nf}(t_{i-1}, t_i) &= \lambda_{out}^{p,nf}(t_{i-1}) \cdot (t_i - t_{i-1}). \end{aligned} \quad (4.30)$$

Kumulierte Flussmengen für einen Zeitraum, der mehrere Simulationszeitschritte umfasst, berechnen sich durch die Addition der kumulierten Flussmengen und der Impulse während der Zeitschritte.

### 4.6.3 Montageelement (M)

Das Montageelement (siehe Abbildung 4.18) dient zur Abbildung von Prozessen, bei denen mehrere Produkttypen in einem definierten Verhältnis in einen neuen Produkttyp übergehen, wie beispielsweise bei Montage-, Verpackungs- oder Kommissionierprozessen. In der Abbildung links sind die Steuerungsvariablen des Montageelements abgebildet und rechts die Eingangs-, Bestands- und Ausgangsvariablen.

Das Montageelement ist ein Erweiterungselement für den Trichter und kann nur zusammen mit ihm genutzt werden.

Ein Montageelement kann mehrere Inputkanäle aber nur einen Outputkanal besitzen. Es steuert über das Montageverhältnis und die eigene Grenzleistung den Trichteroutput. Die Ausgänge des vorgeschalteten Trichters können mit keinem anderen Element außer

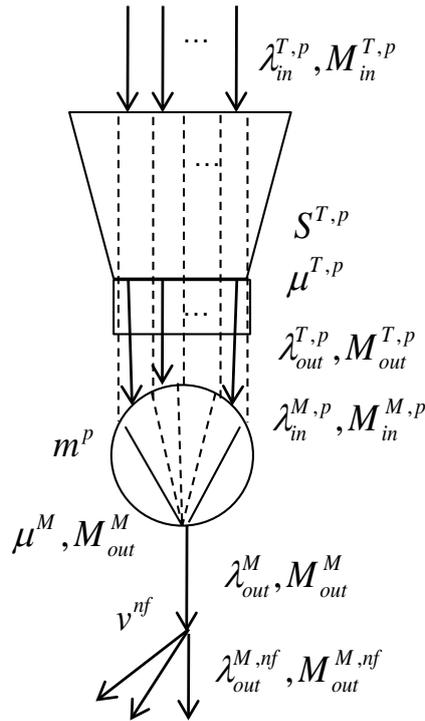


Abbildung 4.18: Modellierungselement Montage

dem nachgeschalteten Montageelement verbunden sein. In einem Montageelement kann sich kein Bestand aufbauen. Diese Funktion übernimmt der vorgeschaltete Trichter.

Die Bildung der Ausgangsströme an einem Montageelement ist mit keiner Zeitverzögerung verbunden. Verzögerungen an einem Montageelement entstehen nur, wenn sich Bestände im vorgeschalteten Trichterkanal aufbauen, weil die Inputflussrate größer als die Grenzleistung ist oder die Grenzleistung auf Null gesetzt wird.

An einem Montageelement können neue Produktportionen gebildet werden. Sie erhalten als Attribute die Bestandteile an vorher definierten Produktportionen. Abbildung 4.19 zeigt, wie die Verfolgung von Produktportionen an einem Montageelement funktioniert.

Der Zustand der abgebildeten Flussprozesse an einem Montageelement wird durch die in Tabelle 4.5 aufgeführten Bestands- und Flussgrößen beschrieben. Weiterhin sind in der Tabelle die Variablen aufgeführt, über die das Montageelement die Flüsse steuern kann. Die Tabelle enthält nur die Variablen, die direkt am Montageelement auftreten. Die Variablen des vorgeschalteten Trichters werden nicht noch einmal in der Tabelle aufgeführt.

### Berechnung der Fluss- und Bestandsgrößen

#### 1. Bestand vorgeschalteter Trichter

Da Montageelemente selbst keinen Bestand aufbauen können und mit einem Trichter gekoppelt sind, erfolgt die Bestandsberechnung für die Bestände der Trichter-

Tabelle 4.5: Modellvariablen an einem Montageelement

Input	$\lambda_{in}^{M,p}(t_i)$	Intensität des Inputflusses für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$\lambda_{in}^M(t_i)$	Intensität des Inputflusses über alle Produkttypen $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$C_{in}^{M,p}(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge für Produkttyp $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$C_{in}^M(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge über alle Produkttypen $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$M_{in}^{M,p}(t_i)$	Menge eines Inputimpulses für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$M_{in}^M(t_i)$	Menge eines Inputimpulses über alle Produkttypen $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Steuerung	$\mu^M(t_i)$	Grenzleistung für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$M_{out}^M(t_i)$	Menge eines Outputimpulses zum Zeitpunkt $t_i$
Steuerung	$m^p(t_i)$	Montageverhältnis für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$ , d. h. wie viel Inputmenge von Produkttyp $p$ für eine Outputeinheit benötigt wird
Steuerung	$p_{out}(t_i)$	ID Outputprodukttyp für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$b_{out}^p(t_i)$	ID Outputproduktportion für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$v^{nf}(t_i)$	Verteilung des Outputflusses an das nachfolgende Modellelement $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}^M(t_i)$	Intensität des Outputflusses für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}^{M,nf}(t_i)$	Intensität des Outputflusses zum Nachfolger $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$C_{out}^M(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$C_{out}^{nf}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge zum Nachfolger $nf$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$M_{out}^M(t_i)$	Menge eines Outputimpulses zum Zeitpunkt $t_i$
Output	$M_{out}^{M,nf}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses zum Nachfolger $nf$ zum Zeitpunkt $t_i$

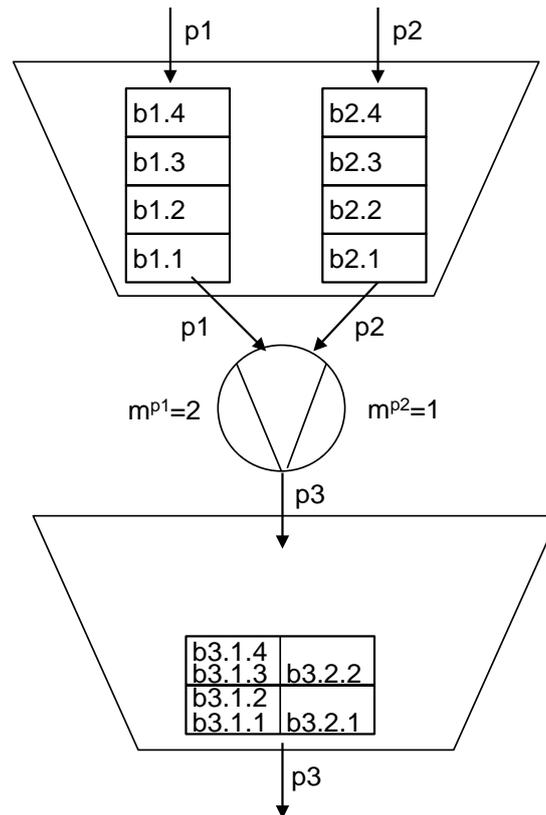


Abbildung 4.19: Verfolgung von Produktportionen an einem Montageelement

kanäle. Die Berechnung erfolgt analog der Berechnung in Abschnitt 4.6.2.

#### 2. *Inputfluss vorgeschalteter Trichter*

Da vor jedes Montageelement ein Trichter geschaltet ist, muss zuerst der Inputfluss für den Trichter berechnet werden. Die Berechnung der Inputflüsse der vorgeschalteten Trichterkanäle erfolgt ebenfalls analog zu den Berechnungen in Abschnitt 4.6.2.

#### 3. *Steuerungsvariablen Montageelement*

Die Änderung der Steuerungsvariablen an einem Montageelement ist immer mit einem vordefinierten oder steuerungsbedingten Ereignis verbunden. Die Steuerung der Flüsse an einem Montageelement kann durch die Grenzleistung des Montageelements  $\mu^M$ , das Auslösen eines zeitlosen Impulses  $M_{out}^M$ , das Montageverhältnis  $m^p$ , über die Verteilung des Outputflusses auf verschiedene nachfolgende Modellelemente  $v^{nf}$  und über die Vergabe einer Produkttyp-ID  $p_{out}$  und von Produktportionen-IDs  $b_{out}$  für den ausgehenden Fluss erfolgen.

#### 4. *Outputfluss Montageelement*

Die Berechnung des Outputflusses des Montageelements lässt sich in zwei Schritte unterteilen. Zuerst muss über den Trichteroutput, der von der Grenzleistung des Montageelements und den aktuellen Beständen und Eingangsströmen der Trichter-

kanäle abhängig ist, der Input des Montageelements bestimmt werden. Im zweiten Schritt kann dann mit Hilfe des Montageverhältnisses der Output des Montageelements berechnet werden.

a) *Inputfluss Montageelement*

Die Intensität des Inputflusses eines Montageelementkanals entspricht der Intensität des Outputflusses des vorgeschalteten Trichterkanals mit dem gleichen Produkttyp:

$$\lambda_{in}^{M,p}(t_i) = \lambda_{out}^{T,p}(t_i) \quad (4.31)$$

Der Outputfluss des vorgeschalteten Trichters wird durch das Montageelement gesteuert. Für die Berechnung des Outputflusses des Trichters  $\lambda_{out}^{T,p}$  können die folgenden beiden Fälle unterschieden werden:

- Fall 1: Das Montageelement kann mit maximaler Grenzleistung arbeiten. Dafür muss für jeden Kanal (Produkttyp) des vorgeschalteten Trichters eine der beiden folgenden Bedingungen erfüllt sein:
  - Der Bestand in jedem Trichterkanal (für jeden Produkttyp) ist größer als Null oder
  - der Inputfluss jedes Trichterkanals (für jeden Produkttyp) ist groß genug, um die Grenzleistung des Montageelements auszunutzen.

$$S^p > 0 \quad \text{oder} \quad \lambda_{in}^{T,p}(t_i) \geq \mu^M(t_i) \cdot m^p(t_i) \quad \text{für alle } p \in P^T \quad (4.32)$$

- Fall 2: Das Montageelement kann nicht mit maximaler Grenzleistung arbeiten. Dieser Fall tritt ein, wenn für mindestens einen Trichterkanal (Produkttyp) die folgenden beiden Bedingungen gelten:
  - Der Bestand im Trichterkanal ist Null und
  - der Inputfluss des Trichterkanals ist nicht groß genug, um die Grenzleistung des Montageelements auszunutzen.

$$\exists p \in P^T : S^p(t_i) = 0 \quad \text{und} \quad \lambda_{in}^{T,p}(t_i) \leq \mu^M(t_i) \cdot m^p(t_i) \quad (4.33)$$

Für Fall 1 berechnet sich der Outputfluss eines Trichterkanals wie folgt:

$$\lambda_{out}^{T,p}(t_i) = \mu^M(t_i) \cdot m^p(t_i), \quad (4.34)$$

so dass nach Gleichung 4.31 für den Inputfluss eines Montagekanals folgt:

$$\lambda_{in}^{M,p}(t_i) = \mu^M(t_i) \cdot m^p(t_i). \quad (4.35)$$

Für Fall 2 gilt für die Berechnung des Outputflusses eines Trichterkanals:

$$\lambda_{out}^{T,p}(t_i) = m^p(t_i) \cdot \min \left\{ \frac{\lambda_{in}^{T,\tilde{p}}(t_i)}{m^{\tilde{p}}(t_i)} \mid \tilde{p} \in P^T : S^{\tilde{p}}(t_i) = 0 \right\}, \quad (4.36)$$

so dass nach Gleichung 4.31 für den Inputfluss eines Montagekanals folgt:

$$\lambda_{in}^{M,p}(t_i) = m^p(t_i) \cdot \min \left\{ \frac{\lambda_{in}^{T,\tilde{p}}(t_i)}{m^{\tilde{p}}(t_i)} \mid \tilde{p} \in P^T : S^{\tilde{p}}(t_i) = 0 \right\}. \quad (4.37)$$

b) *Outputfluss Montageelement*

Die Intensität des Outputflusses des Montageelements lässt sich aus dem Inputfluss eines beliebigen Montageelementkanals und dem entsprechenden Montageverhältnis berechnen:

$$\lambda_{out}^M(t_i) = \frac{\lambda_{in}^{M,p}(t_i)}{m^p(t_i)}. \quad (4.38)$$

Daraus folgt für den Outputfluss des Montageelements für die beiden oben beschriebenen Fälle:

$$\lambda_{out}^M(t_i) = \begin{cases} \mu^M(t_i) \text{ für Fall 1,} \\ \lambda_{out}^M(t_i) = \min \left\{ \frac{\lambda_{in}^{T,\tilde{p}}(t_i)}{m^{\tilde{p}}(t_i)} \mid \tilde{p} \in P^T : S^{\tilde{p}}(t_i) = 0 \right\} \text{ für Fall 2.} \end{cases} \quad (4.39)$$

Die Berechnung der Impulse an einem Montageelement ist nicht extra aufgeführt. Löst das Montageelement über die Steuerung einen Impuls aus, werden entsprechend dem Montageverhältnis die benötigten Mengen aus dem Bestand des vorgeschalteten Trichters entnommen. Ist der Bestand des Trichters nicht ausreichend, so wird analog der Berechnung für die Flussraten in Fall 2 nur der maximal mögliche Impuls ausgelöst.

#### 4.6.4 Demontageelement (D)

Das Demontageelement dient zur Abbildung von Prozessen, bei denen ein Produkttyp in einem definierten Verhältnis in mehrere Produkttypen übergeht, wie z. B. Demontageprozesse oder Depalletierprozesse.

Das Demontageelement ist ein Erweiterungselement für den Trichter und kann nur zusammen mit ihm genutzt werden.

Ein Demontageelement kann mehrere Outputkanäle aber nur einen Inputkanal besitzen. Es kann nur zusammen mit einem vorgeschalteten Trichter verwendet werden. Das Demontageelement steuert den Trichteroutput über die eigene Grenzleistung. Ein Bestand kann sich in einem Demontageelement nicht aufbauen.

Die Bildung der Ausgangsströme an einem Demontageelement ist nicht mit einer Zeitverzögerung verbunden. Verzögerungen an einem Demontageelement entstehen nur, wenn sich Bestände im vorgeschalteten Trichter aufbauen, wenn die Inputflussrate größer als die Grenzleistung ist oder die Grenzleistung auf Null gesetzt wird. Wenn es unbedingt

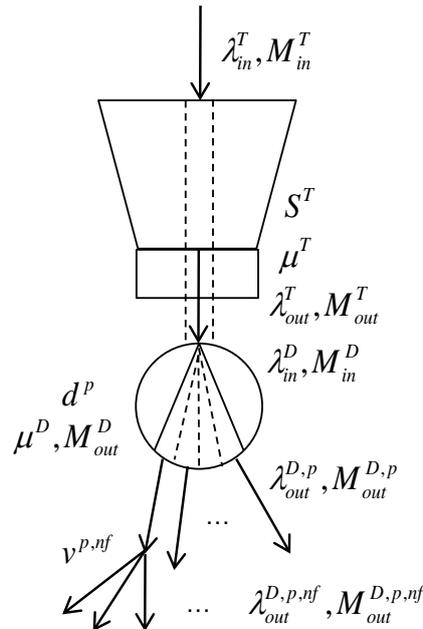


Abbildung 4.20: Modellierungselement Demontage

notwendig ist Verzögerungen abzubilden, kann dafür das Verzögerungselement verwendet werden.

An einem Demontageelement können neue Produktportionen gebildet werden. Sie erhalten als Attribute die Bestandteile an vorher definierten Produktportionen. Abbildung 4.21 zeigt, wie die Verfolgung von Produktportionen an einem Demontageelement funktioniert.

Der Zustand der abgebildeten Flussprozesse an einem Demontageelement wird durch die in Tabelle 4.6 aufgeführten Bestands- und Flussgrößen beschrieben. Weiterhin sind in der Tabelle die Variablen aufgeführt, über die das Demontageelement die Flüsse steuern kann. Die Tabelle enthält nur die Variablen, die direkt am Demontageelement auftreten. Die Variablen des vorgeschalteten Trichters werden nicht noch einmal in der Tabelle aufgeführt.

### Berechnung der Fluss- und Bestandsgrößen

#### 1. Berechnung Steuerungsvariablen Demontageelement

Die Änderung der Steuerungsvariablen ist immer mit einem vordefinierten oder steuerungsbedingtem Ereignis verbunden. Die Steuerung der Flüsse an einem Demontageelement kann durch die Grenzleistung des Demontageelements  $\mu^D$ , das Auslösen eines zeitlosen Impulses  $M_{out}$ , das Demontageverhältnis  $d^p$ , über die Verteilung des Outputflusses auf verschiedene nachfolgende Modellelemente  $v^{nf}$  und über die Vergabe von Produkttypen-IDs  $p_{out}$  und Produktportionen IDs  $b_{out}$  für die ausgehenden Flüsse erfolgen.

Tabelle 4.6: Modellvariablen an einem Demontageelement

Input	$\lambda_{in}^D(t_i)$	Intensität des Inputflusses für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$M_{in}^D(t_i)$	Menge eines Inputimpulses zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$C_{in}^D(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Steuerung	$\mu^D(t_i)$	Grenzleistung für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$M_{out}^D(t_i)$	Menge eines Outputimpulses zum Zeitpunkt $t_i$
Steuerung	$d^p(t_i)$	Demontageverhältnis für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$ , d. h. wie viel Output für Produkttyp $p$ aus einer Inputeinheit entsteht
Steuerung	$p_{out}(t_i)$	ID Outputprodukttyp für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$b_{out}^p(t_i)$	ID Outputproduktportion für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$v^{p,nf}$	Verteilung des Outputflusses von Produkttyp $p$ an das nachfolgende Modellelement $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}^{D,p}(t_i)$	Intensität des Outputflusses für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}^{D,p,nf}(t_i)$	Intensität des Outputflusses für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$C_{out}^{D,p}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge für Produkttyp $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$C_{out}^{D,p,nf}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$M_{out}^{D,p}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Output	$M_{out}^{D,p,nf}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ zum Zeitpunkt $t_i$

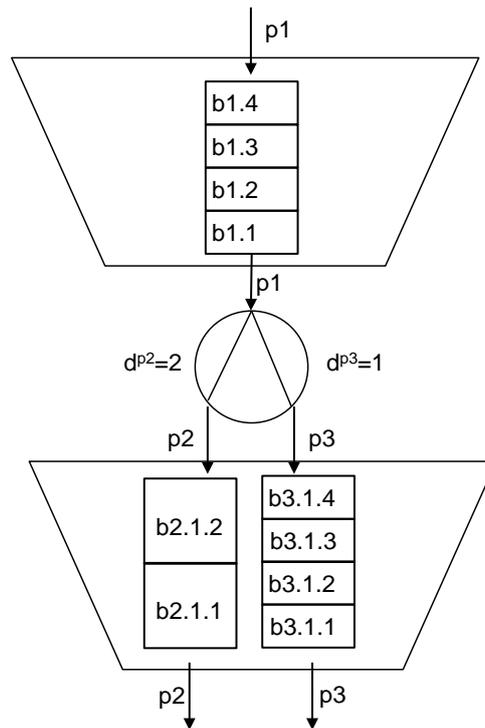


Abbildung 4.21: Verfolgung von Produktportionen an einem Demontageelement

## 2. Bestand vorgeschalteter Trichter

Da Demontageelemente selbst keinen Bestand aufbauen können und mit einem Trichter gekoppelt sind, erfolgt die Bestandsberechnung für den Bestand des vorgeschalteten Trichterkanals. Die Berechnung wird analog der Berechnung in Abschnitt 4.6.2 ausgeführt.

## 3. Inputfluss vorgeschalteter Trichter

Die Berechnung des Inputflusses des vorgeschalteten Trichterkanals erfolgt analog der Berechnung in Abschnitt 4.6.2.

## 4. Outputfluss Demontageelement

Die Berechnung des Outputflusses des Demontageelements lässt sich in zwei Schritte unterteilen. Zuerst muss über den Trichteroutput, der von der Grenzleistung des Demontageelements und dem aktuellen Bestand und Eingangsstrom des Trichterkanals abhängig ist, der Input des Demontageelements bestimmt werden. Im zweiten Schritt kann dann mit Hilfe des Demontageverhältnisses der Output des Demontageelements berechnet werden.

### a) Inputfluss Demontageelement

Die Intensität des Inputflusses des Demontageelements entspricht der Intensität des Outputflusses des vorgeschalteten Trichters:

$$\lambda_{in}^D(t_i) = \lambda_{out}^T(t_i) \quad (4.40)$$

Der Outputfluss  $\lambda_{out}^T$  des vorgeschalteten Trichters lässt sich mit Gleichung 4.26 aus Abschnitt 4.6.2 berechnen, wobei die Grenzleistung des vorgeschalteten Trichters durch die Grenzleistung des Demontageelements bestimmt wird:

$$\mu^T(t_i) = \mu^D(t_i). \quad (4.41)$$

Für die Berechnung von  $\lambda_{in}^D(t_i)$  folgt aus den Gleichungen 4.26, 4.40 und 4.41:

$$\lambda_{in}^D(t_i) = \begin{cases} \lambda_{in}^T(t_i), & \text{wenn } S^T(t_i) = 0 \text{ und } \lambda_{in}^T(t_i) \leq \mu^D(t_i) \\ \mu^D(t_i), & \text{wenn } S^T(t_i) > 0 \text{ oder } \lambda_{in}^T(t_i) \geq \mu^D(t_i). \end{cases} \quad (4.42)$$

b) *Outputfluss Demontageelement*

Die Intensität der Outputflüsse des Demontageelements lässt sich aus seinem Inputfluss und den Demontageverhältnissen berechnen:

$$\lambda_{out}^{D,p}(t_i) = \lambda_{in}^D(t_i) \cdot d^p(t_i). \quad (4.43)$$

Aus den Gleichungen 4.42 und 4.43 folgt für die Berechnung der Outputflussraten des Demontageelements:

$$\lambda_{out}^{D,p}(t_i) = \begin{cases} d^p(t_i) \cdot \lambda_{in}^T(t_i), & \text{wenn } S^T(t_i) = 0 \text{ und } \lambda_{in}^T(t_i) \leq \mu^D(t_i), \\ d^p(t_i) \cdot \mu^D(t_i), & \text{wenn } S^T(t_i) > 0 \text{ oder } \lambda_{in}^T(t_i) \geq \mu^D(t_i). \end{cases} \quad (4.44)$$

Die Berechnung der Impulse an einem Demontageelement ist nicht extra aufgeführt. Löst das Demontageelement über die Steuerung Impulse aus, wird entsprechend dem Demontageverhältnis die benötigte Menge aus dem Bestand des vorgeschalteten Trichters entnommen. Ist der Bestand des Trichters nicht ausreichend, so werden nur die maximal möglichen Impulse ausgelöst.

### 4.6.5 Verzögerungselement (V)

Das Verzögerungselement (siehe Abbildung 4.22) dient der Abbildung von Verzögerungen, wie z. B. von Transport-, Liege- oder Bearbeitungszeiten. Die Steuerungsvariablen sind in der Abbildung unten dargestellt, die Eingangs-, Bestands- und Ausgangsgrößen oben.

Ein Verzögerungselement kann mehrere parallele Kanäle besitzen. Für jeden durchfließenden Produkttyp besitzt das Verzögerungselement einen Kanal. Jeder Kanal eines Verzögerungselements kann einzeln gesteuert werden. Ein Verzögerungselement nimmt Flüsse oder Impulse auf und gibt sie nach Ende der Verzögerungszeit wieder ab.

Der Zustand der abgebildeten Flussprozesse an einem Verzögerungselement wird durch die in Tabelle 4.7 aufgeführten Bestands- und Flussgrößen beschrieben. Weiterhin sind in

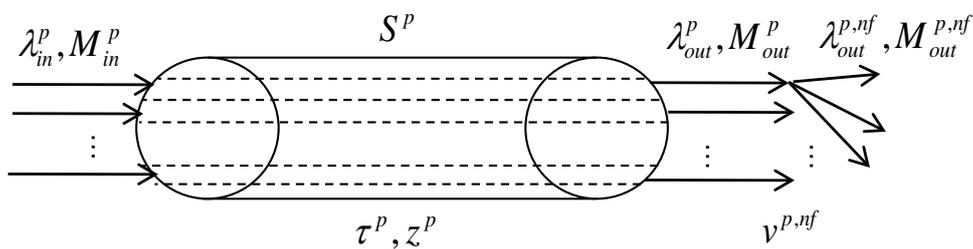
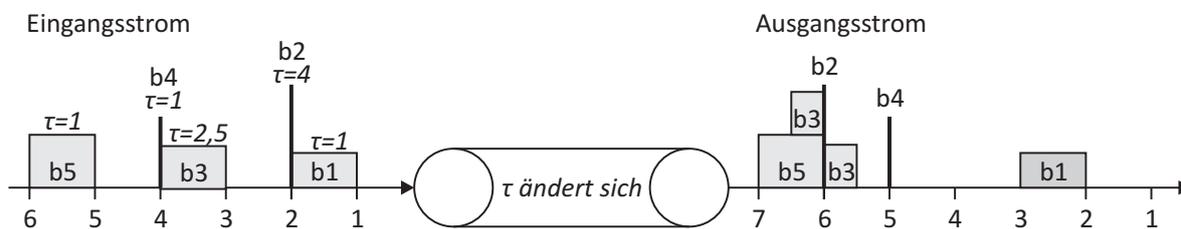


Abbildung 4.22: Verzögerungselement

Verzögerungszeit ändert sich



Verzögerungszeit bleibt gleich

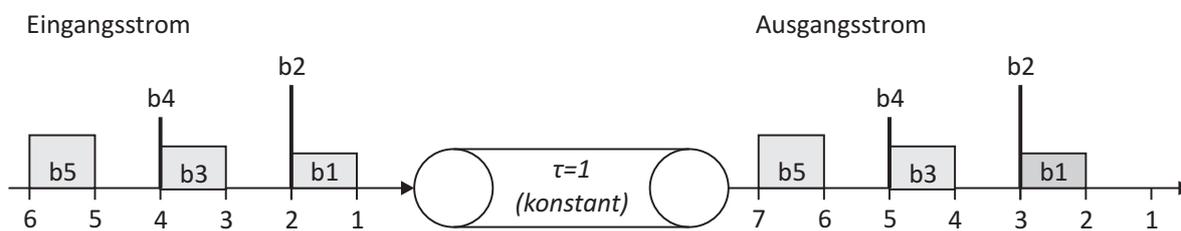


Abbildung 4.23: Produktportionen an einem Verzögerungselement

Tabelle 4.7: Modellvariablen an einem Verzögerungselement

Bestand	$S^p(t_i)$	Bestand für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Bestand	$S(t_i)$	Bestand über alle Produkttypen zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$\lambda_{in}^{p,vg}(t_i)$	Intensität des Inputflusses für Produkttyp $p$ vom Vorgänger $vg$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$\lambda_{in}^p(t_i)$	Intensität des Inputflusses für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$\lambda_{in}(t_i)$	gesamte Intensität des Inputflusses über alle Produkttypen für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$C_{in}^{p,vg}(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge für Produkttyp $p$ vom Vorgänger $vg$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$C_{in}^p(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge für Produkttyp $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$C_{in}(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge über alle Produkttypen im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$M_{in}^{p,vg}(t_i)$	Menge eines Inputimpulses für Produkttyp $p$ vom Vorgänger $vg$ zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$M_{in}^p(t_i)$	Menge eines Inputimpulses für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$M_{in}(t_i)$	Menge eines Inputimpulses über alle Produkttypen zum Zeitpunkt $t_i$
Steuerung	$\tau^p(t_i)$	Verzögerungszeit für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$z^p$	Zustand des Verzögerungselements (an/aus)
Steuerung	$v^{p,nf}(t_i)$	Verteilung des Outputflusses von Produkttyp $p$ an das nachfolgende Modellelement $nf$
Output	$\lambda_{out}(t_i)$	Intensität des Outputflusses über alle Produkttypen $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}^p(t_i)$	Intensität des Outputflusses für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}^{p,nf}(t_i)$	Intensität des Outputflusses für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$C_{out}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge über alle Produkttypen $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$C_{out}^p(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge für Produkttyp $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$C_{out}^{p,nf}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$M_{out}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses über alle Produkttypen $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Output	$M_{out}^p(t_i)$	Menge eines Outputimpulses für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Output	$M_{out}^{p,nf}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ zum Zeitpunkt $t_i$

der Tabelle die Variablen aufgeführt, über die das Verzögerungselement die Flüsse steuern kann.

Eine Änderung der Verzögerungszeit  $\tau$  gilt nur für die nach dem Zeitpunkt der Änderung am Verzögerungselement eintreffenden Inputflüsse und -impulse. Die sich bereits auf dem Verzögerungselement befindenden Flüsse und Impulse behalten ihre vorher festgelegte Verzögerungszeit bei.

Eine Änderung der Verzögerungszeit kann dazu führen, dass sich Flussportionen überholen (siehe Abbildung 4.23). Wenn innerhalb eines homogenen Produkttyps keine Produktportionen unterschieden werden, spielt diese Eigenschaft keine Rolle. Durch das Ändern der Verzögerungszeit kann es am Ausgang zu Überlagerungen von Flüssen kommen, so dass sich die Ausgangsflussraten von den Eingangsflussraten unterscheiden können. Wenn sich die Verzögerungszeit  $\tau$  nicht ändert, ist ein Überholen innerhalb des Verzögerungselements nicht möglich und es gilt das FIFO-Prinzip (siehe Abbildung 4.23).

Das Stoppen des Verzögerungselements verzögert alle sich im Verzögerungselement befindenden Flüsse um die Dauer des Stopps. Das Stoppen eines Verzögerungselements muss über die Modellsteuerung mit der Sperrung der vorgeschalteten Modellelementkanäle verbunden werden. Ein Stau für einen bestimmten Teil des Flusses kann mit Hilfe eines zweiten Verzögerungselements modelliert werden, über das während einer definierten Zeit der Fluss umgeleitet wird.

Eine virtuelle Transporteinheit wird gebildet, wenn beispielsweise zeitgleich verschiedene Produkttypen auf einem Lkw transportiert werden sollen. Zuerst muss der vorgeschaltete Trichter gesperrt werden ( $\mu^p(t_i) = 0$  für alle  $p$ ), da in diesem Fall aus dem Trichter nur Impulse ausfließen sollen. Wenn die Gesamtmenge im Trichter die benötigte Ladungsmenge erreicht hat, werden gleichzeitig in allen Kanälen des Trichters Impulse auf das Verzögerungselement geschickt. Die Gesamtmenge aller Impulse entspricht dann der Ladung des LKW.

## Berechnung der Fluss- und Bestandsgrößen

### 1. Steuerungsvariablen

Die Steuerung der Flüsse an einem Verzögerungselementkanal kann durch die Verzögerungszeit  $\tau^p$ , das An- oder Ausschalten eines Verzögerungselementkanals  $z^p$  und über die Verteilung des Outputflusses auf verschiedene nachfolgende Modellelemente  $v^{p,nf}$  erfolgen.

### 2. Bestand

Der Bestand eines Kanals eines Verzögerungselements errechnet sich folgendermaßen:

- Bei Flüssen:

$$S^p(t_i) = S^p(t_{i-1}) + (\lambda_{in}^p(t_{i-1}) - \lambda_{out}^p(t_{i-1})) \cdot (t_i - t_{i-1}). \quad (4.45)$$

- Bei Impulsen:

$$\begin{aligned} S^p(t_i) &= S^p(t_{i-1}) + M_{in}^p(t_i) \text{ bzw.} \\ S^p(t_i) &= S^p(t_{i-1}) - M_{out}^p(t_i). \end{aligned} \quad (4.46)$$

### 3. Inputfluss

Die Intensität des Inputflusses beziehungsweise die Größe eines Inputimpulses eines Verzögerungselementkanals ergibt sich aus der Summe der Intensitäten aller Outputflüsse beziehungsweise Outputimpulse anderer Modellelemente, die diesen Kanal als Ziel haben:

$$\begin{aligned} \lambda_{in}^p(t_i) &= \sum_{VG} \lambda_{out}^{vg,p}(t_i), \\ M_{in}^p(t_i) &= \sum_{VG} M_{out}^{vg,p}(t_i). \end{aligned} \quad (4.47)$$

### 4. Outputfluss

In Abhängigkeit von der festgelegten Verzögerungszeit eines Verzögerungselementkanals  $\tau^p$  kann nun die Outputflussrate beziehungsweise der Outputimpuls für diesen Kanal ermittelt werden. Der Ausgangsstrom an einem Verzögerungselementkanal wiederholt den Eingangsstrom mit einer Verzögerung von  $\tau^p$ , wenn sich die Verzögerungszeit nicht ändert. Das führt zur Planung eines internen Ereignisses zum Zeitpunkt  $t_i + \tau^p$ . Zu diesem Zeitpunkt startet der Outputfluss beziehungsweise wird der Outputimpuls ausgelöst:

$$\begin{aligned} \lambda_{out}^p(t_i + \tau^p) &= \lambda_{in}^p(t_i) \\ M_{out}^p(t_i + \tau^p) &= M_{in}^p(t_i) \end{aligned} \quad (4.48)$$

## 4.6.6 Quelle (Q)

Quellen (siehe Abbildung 4.24) bilden neben den Senken die Grenze des betrachteten Logistiksystems ab. Links in der Abbildung sind wiederum die Steuerungsvariablen abgebildet und rechts die Ausgangsgrößen. Das Modellelement Quelle dient zur Generierung von Flüssen und Impulsen, die in das modellierte System hineinfließen. Eine Quelle kann mehrere parallele Kanäle besitzen, wenn in ihr verschiedene Produkttypen erzeugt werden. Für jeden Produkttyp gibt es einen eigenen Kanal, der einzeln gesteuert werden kann.

Der Zustand der abgebildeten Flussprozesse an einer Quelle wird durch die in Tabelle 4.8 aufgeführten Bestands- und Flussgrößen beschrieben. Weiterhin sind in der Tabelle die Variablen aufgeführt, über die eine Quelle die Flüsse steuern kann.

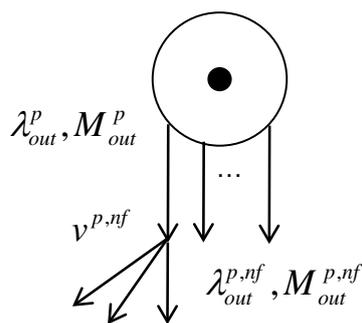


Abbildung 4.24: Quelle

Tabelle 4.8: Modellvariablen an einer Quelle

Steuerung	$\lambda_{out}^p(t_i)$	Intensität des Outputflusses für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$M_{out}^p(t_i)$	Menge eines Outputimpulses für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Steuerung	$v^{p,nf}(t_i)$	Verteilung des Outputflusses bzw. -impulses für Produkttyp $p$ an das nachfolgende Modellelement $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$p_{out}(t_i)$	ID Outputprodukttyp für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Steuerung	$b_{out}(t_i)$	ID Outputproduktportion für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}(t_i)$	Intensität des Outputflusses über alle Produkttypen $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}^p(t_i)$	Intensität des Outputflusses für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$\lambda_{out}^{p,nf}(t_i)$	Intensität des Outputflusses für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Output	$C_{out}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge über alle Produkttypen $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$C_{out}^p(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge für Produkttyp $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$C_{out}^{p,nf}(t_i, t_j)$	kumulierte Outputflussmenge für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Output	$M_{out}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses über alle Produkttypen $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Output	$M_{out}^p(t_i)$	Menge eines Outputimpulses für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Output	$M_{out}^{p,nf}(t_i)$	Menge eines Outputimpulses für Produkttyp $p$ zum Nachfolger $nf$ zum Zeitpunkt $t_i$

### Berechnung der Fluss- und Bestandsgrößen

An einer Quelle müssen nur die letzten beiden Schritte des in Abbildung 4.13 dargestellten Berechnungsablaufs an den Modellelementen vorgenommen werden.

#### 3. Steuerungsvariablen

Die Steuerung der Flüsse an einer Quelle kann durch den Outputfluss  $\lambda_{out}^p$ , durch das Auslösen eines zeitlosen Impulses  $M_{out}^p$ , über die Verteilung des Outputflusses auf verschiedene nachfolgende Modellelemente  $v^{p,nf}$  und über die Vergabe von Produkttypen-IDs  $p_{out}$  und Produktportionen IDs  $b_{out}$  für die ausgehenden Flüsse erfolgen.

#### 4. Output

Die Steuerung des Outputflusses erfolgt über vordefinierte oder steuerungsbedingte Ereignisse.

### 4.6.7 Senke (S)

Senken (siehe Abbildung 4.25) bilden neben den Quellen die Grenze des betrachteten Logistiksystems ab. Senken nehmen alle Flüsse auf, die das modellierte System verlassen. Eine Senke kann mehrere parallele Kanäle besitzen. Für jeden Produkttyp gibt es einen eigenen Kanal. Der Zustand der abgebildeten Flussprozesse an einer Senke wird durch die in Tabelle 4.9 aufgeführten Bestands- und Flussgrößen beschrieben. Steuerungen finden an einer Senke nicht statt.

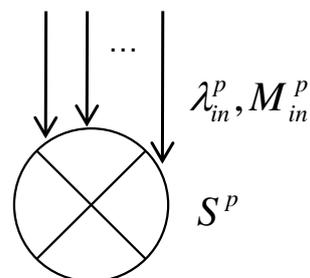


Abbildung 4.25: Senke

### Berechnung der Fluss- und Bestandsgrößen

An einer Senke müssen nur die ersten beiden Schritte des in Abbildung 4.13 dargestellten Berechnungsablaufs an den Modellelementen vorgenommen werden.

#### 1. Bestand

Der Bestand eines Kanals einer Senke errechnet sich folgendermaßen:

Tabelle 4.9: Modellvariablen an einer Senke

Bestand	$S^p(t_i)$	Bestand für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Bestand	$S(t_i)$	Bestand über alle Produkttypen zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$\lambda_{in}^{p,vg}(t_i)$	Intensität des Inputflusses für Produkttyp $p$ vom Vorgänger $vg$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$\lambda_{in}^p(t_i)$	Intensität des Inputflusses für Produkttyp $p$ für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$\lambda_{in}(t_i)$	gesamte Intensität des Inputflusses über alle Produkttypen für den Zeitschritt $[t_i, t_{i+1}]$
Input	$C_{in}^{p,vg}(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge für Produkttyp $p$ vom Vorgänger $vg$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$C_{in}^p(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge für Produkttyp $p$ im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$C_{in}(t_i, t_j)$	kumulierte Inputflussmenge über alle Produkttypen im Zeitraum $[t_i, t_j]$
Input	$M_{in}^{p,vg}(t_i)$	Menge eines Inputimpulses für Produkttyp $p$ vom Vorgänger $vg$ zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$M_{in}^p(t_i)$	Menge eines Inputimpulses für Produkttyp $p$ zum Zeitpunkt $t_i$
Input	$M_{in}(t_i)$	Menge eines Inputimpulses über alle Produkttypen zum Zeitpunkt $t_i$

- Bei Flüssen:

$$S^p(t_i) = S^p(t_{i-1}) + \lambda_{in}^p(t_{i-1}) \cdot (t_i - t_{i-1}). \quad (4.49)$$

- Bei Impulsen:

$$S^p(t_i) = S^p(t_{i-1}) + M_{in}^p(t_i) \quad (4.50)$$

## 2. Input

Die Intensität des Inputflusses beziehungsweise die Größe eines Inputimpulses eines Kanals einer Senke ergibt sich aus der Summe der Intensitäten aller Outputflüsse beziehungsweise Outputimpulse der Vorgängerelemente, die diesen Kanal der Senke als Ziel haben:

$$\begin{aligned} \lambda_{in}^p(t_i) &= \sum_{VG} \lambda_{out}^{vg,p}(t_i), \\ M_{in}^p(t_i) &= \sum_{VG} M_{out}^{vg,p}(t_i). \end{aligned} \quad (4.51)$$

### 4.6.8 Zusammenfassung

Tabelle 4.10 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die mesoskopischen Modellelemente und die mesoskopischen Modellvariablen. Es sind sowohl die Fluss- und Bestandsgrößen abgebildet, die die Flussprozesse beschreiben, als auch die Steuerungsvariablen, über die eine Steuerung der mesoskopischen Modellelemente und damit der logistischen Flüsse erfolgen kann.

Tabelle 4.10: Modellelemente und Modellvariablen im Überblick

		Quelle	Trichter	Verzögerung	Montage	Demontage	Senke
Bestand	$S(t_i)$	–	✓	✓	–	–	✓
Bestand	$S^p(t_i)$	–	✓	✓	–	–	✓
Input	$\lambda_{in}^{p,vg}(t_i)$	–	✓	✓	✓	✓	✓
Input	$\lambda_{in}^p(t_i)$	–	✓	✓	✓	✓	✓
Input	$\lambda_{in}(t_i)$	–	✓	✓	✓	✓	✓
Input	$C_{in}^{p,vg}(t_i, t_j)$	–	✓	✓	✓	✓	✓
Input	$C_{in}^p(t_i, t_j)$	–	✓	✓	✓	✓	✓
Input	$C_{in}(t_i, t_j)$	–	✓	✓	✓	✓	✓
Input	$M_{in}^{p,vg}(t_i)$	–	✓	✓	✓	✓	✓
Input	$M_{in}^p(t_i)$	–	✓	✓	✓	✓	✓
Input	$M_{in}(t_i)$	–	✓	✓	✓	✓	✓
Steuerung	$\mu^p(t_i)$	–	✓	–	✓	✓	–
Steuerung	$\lambda_{out}^p(t_i)$	✓	–	–	–	–	–
Steuerung	$M_{out}^p(t_i)$	✓	✓	–	✓	✓	–
Steuerung	$\tau^p(t_i)$	–	–	✓	–	–	–
Steuerung	$z^p(t_i)$	–	–	✓	–	–	–
Steuerung	$v^{p,nf}(t_i)$	✓	✓	✓	✓	✓	–
Steuerung	$m^p(t_i)$	–	–	–	✓	–	–
Steuerung	$d^p(t_i)$	–	–	–	–	✓	–
Steuerung	$p_{out}(t_i)$	✓	–	–	✓	✓	–
Steuerung	$b_{out}(t_i)$	✓	–	–	✓	✓	–
Output	$\lambda_{out}(t_i)$	✓	✓	✓	✓	✓	–
Output	$\lambda_{out}^p(t_i)$	✓	✓	✓	✓	✓	–
Output	$\lambda_{out}^{p,nf}(t_i)$	✓	✓	✓	✓	✓	–
Output	$C_{out}(t_i, t_j)$	✓	✓	✓	✓	✓	–
Output	$C_{out}^p(t_i, t_j)$	✓	✓	✓	✓	✓	–
Output	$C_{out}^{p,nf}(t_i, t_j)$	✓	✓	✓	✓	✓	–
Output	$M_{out}(t_i)$	✓	✓	✓	✓	✓	–
Output	$M_{out}^p(t_i)$	✓	✓	✓	✓	✓	–
Output	$M_{out}^{p,nf}(t_i)$	✓	✓	✓	✓	✓	–

# 5 Anwendung der mesoskopischen Modellierung und Simulation

## 5.1 Mesoskopischer Simulator

Aus folgenden Gründen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein mesoskopischer Simulator entwickelt, mit dem eine direkte Anwendung des mesoskopischen Ansatzes und der damit verbundenen Nutzung der Vorteile des mesoskopischen Ansatzes möglich ist:

- Existierende Simulationstools für die ereignisdiskrete, kontinuierliche und Discrete-Rate-Simulation sind nicht für eine direkte Umsetzung des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes geeignet. Somit können bei Verwendung der existierenden Simulationstools die Vorteile, die der mesoskopische Ansatz hinsichtlich einer schnellen Modellerstellung und -berechnung bietet, nicht voll genutzt werden. Ein Vergleich der Nutzung eines ereignisdiskreten Simulators, eines System-Dynamics-Simulators und des mesoskopischen Simulators für die Implementierung eines mesoskopischen Modells ist in [Schenk et al. 2009a] zu finden.
- Die Entwicklung von mesoskopischen Einzellösungen mit einer universellen Programmiersprache für jedes zu modellierende System ist zu aufwendig.

Die Simulationssoftware, die für eine Umsetzung des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes am besten geeignet wäre, ist die Software ExtendSim, mit der Discrete-Rate-Modelle umgesetzt werden können. Der entwickelte mesoskopische Simulator bietet im Vergleich zu ExtendSim folgende Vorteile, die eine einfache und direkte Implementierung mesoskopischer Modelle ermöglichen:

- Nutzung aller in Abschnitt 4.6 beschriebenen mesoskopischen Modellelemente (siehe Template der Modellbausteine in der Darstellung der Simulatoroberfläche in Abbildung 5.1).
- Gleichzeitige Nutzung von Flüssen mit stückweise konstanten Flussraten und impulsförmigen Flüssen zwischen zwei Knoten des modellierten Flusssystems.
- Nutzung von Produkttypen und Produktportionen.

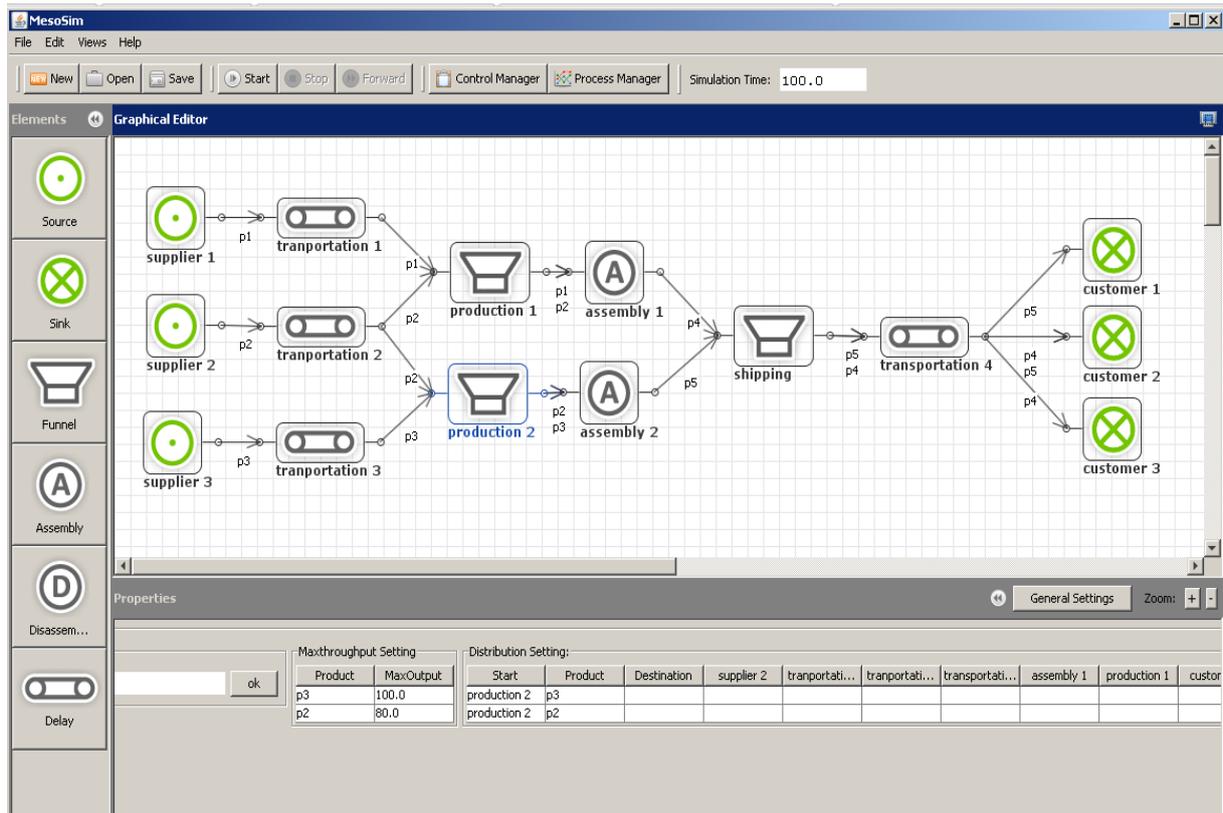


Abbildung 5.1: Grafische Modellerstellung (Screenshot)

- Einfache Definition beliebiger Strategien zur Steuerung logistischer Flussprozesse und zur Ressourcenverteilung.

Der mesoskopische Simulator erlaubt sowohl

- eine grafische Modellerstellung (siehe Abbildung 5.1) als auch
- eine rein skriptbasierte Modellerstellung.

Die Erstellung mesoskopischer Modelle mit der grafischen Oberfläche beinhaltet folgende Schritte:

1. Anordnung der Modellelemente auf der Oberfläche.
2. Verbinden der Modellelemente.
3. Parametrisierung der Modellelemente.
4. Definition von Steuerungsregeln.

Die Definition von beliebigen Steuerungsregeln kann in der grafischen Variante mit Hilfe einer Eingabeunterstützung oder direkt mit der implementierten Skriptsprache erfolgen. Für die Auswertung der Simulation können beliebige Modellvariablen genutzt, aggregiert und zusammen ausgewertet werden.

## 5.2 Anwendungsbeispiele

Nachfolgend werden an zwei Beispielen die Grundprinzipien und typischen Anwendungsfälle der mesoskopischen Modellierung und Simulation skizziert.

Abschnitt 5.2.1 beschreibt die Anwendung des mesoskopischen Ansatzes für das Testen von Strategien der Ressourcenverteilung an einem Logistikhub. Abschnitt 5.2.2 beschreibt die Anwendung für die Abschätzung der Auswirkungen von Störungen und das Ableiten, Testen und Bewerten von Notfallstrategien und Sofortmaßnahmen für die logistische Versorgung eines Montageprozesses. Beide Modelle können sowohl in der Planungsphase als auch in der Betriebsphase genutzt werden.

Weitere einführende Beispiele mesoskopischer Modelle befinden sich in [Schenk et al. 2007] und [Schenk et al. 2008c]. Lösungen für die Ressourcenverteilung in mesoskopischen Modellen sind in [Schenk et al. 2010c] und [Schenk et al. 2010b] zu finden.

### 5.2.1 Ressourcenverteilung an einem Logistikhub

Um das Modell anschaulich zu halten, wird nur ein kleiner Ausschnitt aus dem Distributionsnetzwerk eines Logistikdienstleisters modelliert und simuliert (vgl. [Reggelin u. Tolujew 2008b]):

- Es werden nur die Prozesse an einem einzelnen Hub des gesamten Distributionsnetzwerks modelliert und simuliert (siehe Abbildung 5.2).
- Die Simulation bildet die ablaufenden Prozesse nur für den Zeitraum eines Tages ab.
- Es werden nur die Gutströme für zwei ausgehende Ziele abgebildet.

Mit dem mesoskopischen Ansatz sind Modelle beliebiger Größe einfach handhabbar, da die Rechenzeit nicht von den modellierten Objektmengen abhängt.

Im Modell werden der Wareneingang, die Zwischenlagerung, die Konsolidierung, der Warenausgang und der Weitertransport abgebildet (siehe Abbildung 5.2 oben). Gegeben sind

- der Eingangsstrom an logistischen Gütern am Hub,
- die zur Verfügung stehende Menge an Gabelstaplerressourcen für die Durchführung der Umschlagprozesse am Hub und
- die Transportkapazitäten am Warenausgang.

Eine Aufteilung der insgesamt zur Verfügung stehenden Gabelstaplerressourcen auf Wareneingang und Warenausgang kann zu jeder vollen Stunde erfolgen. Die Gabelstaplerressourcen müssen so eingesetzt werden, dass alle ankommenden Güter am gleichen Tag

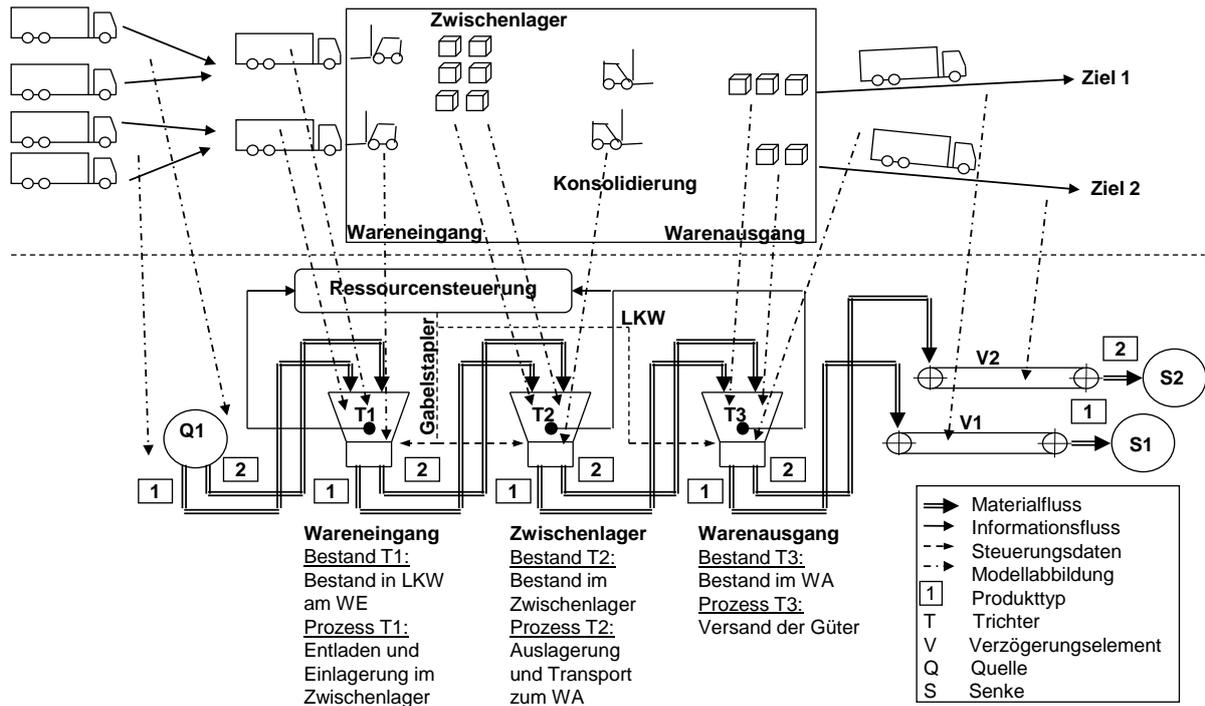


Abbildung 5.2: Mesoskopisches Modell des Hubs

umgeschlagen werden können und somit den Hub wieder verlassen können. Ziel der Simulationsuntersuchung ist es, verschiedene Strategien der Ressourcenverteilung auf diese Anforderung hin zu untersuchen.

Exemplarisch werden folgende drei Strategien bezüglich der Ressourcenverteilung betrachtet. Es wäre auch eine Abbildung beliebiger anderer Strategien möglich.

1. Die Ressourcen werden gleichverteilt und fest zugeordnet, so dass sowohl am Wareneingang und im Zwischenlager für jeden Produkttyp gleich viel Gabelstaplerressourcen zur Verfügung stehen. Das ist die Standardaufteilung der Ressourcen. Hier ist keine Änderung im Tagesverlauf vorgesehen.
2. Im Zwischenlager wird nur die Menge an Gabelstaplerressourcen zur Verfügung gestellt, dass für jeden Produkttyp maximal ein LKW pro Stunde den Hub verlassen kann. Die restlichen Ressourcen stehen am Wareneingang zur Verfügung.
3. Die Gabelstaplerressourcen werden proportional zu den vorhandenen Beständen am Wareneingang und im Zwischenlager verteilt.

Die Eingangsdaten des Modells wurden stundenweise aufbereitet, da auch die Entscheidung über die Ressourcenverteilung stundenweise erfolgen kann und die Dynamik der Eingangsdaten diese Aufbereitung zugelassen hat. Durch diese Übereinstimmung kann die Anzahl der Ereigniszeitpunkte und damit der Berechnungsaufwand reduziert werden. Anhand der beiden Ziele für die umzuschlagenden Güter werden zwei Produkttypen im

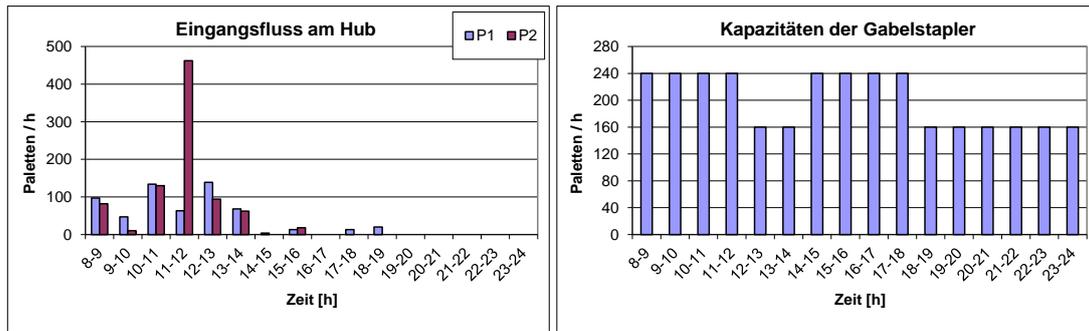


Abbildung 5.3: Eingangsdaten des mesoskopischen Modells

Modell abgebildet. Abbildung 5.3 zeigt den aufbereiteten Eingangsstrom des Hubs für die beiden Produkttypen und die maximalen Gabelstaplerkapazitäten in *Paletten/h* verteilt über einen Arbeitstag. Die gegebenen Gabelstaplerkapazitäten sind Gesamtkapazitäten und nicht vom Einsatzort des Gabelstaplers abhängig. Die Kapazität der Ressource LKW ist für Ziel 1 auf 1 *LKW/h* und für Ziel 2 auf 2 *LKW/h* begrenzt. Ein LKW darf den Hub erst verlassen, wenn der Bestand im Warenausgang (Trichter 3) 50 Paletten erreicht hat.

Zur Darstellung der Logistikprozesse am Hub werden die in Abschnitt 4.6 beschriebenen Modellelemente des mesoskopischen Ansatzes genutzt (siehe Abbildung 5.2). Den Kern des Modells bilden drei zweikanalige Trichter, die die Logistikprozesse am Hub abbilden. Weiterhin werden zwei Verzögerungselemente für den Transport zu den beiden Zielen und zwei Produkttypen (jeweils ein Produkttyp für ein Ziel) verwendet.

Der Eingangsstrom  $\lambda_{in}$  eines Modellelements (Trichter oder Verzögerungselement) wird in jedem Zeitintervall  $\Delta t$  vom vorhergehenden Modellelement und der Ausgangsstrom  $\lambda_{out}$  durch die Steuerung der Ressourcen bestimmt. Der Bestand  $S$  eines Modellelements (Trichter oder Verzögerungselement) ergibt sich als Differenz zwischen den beiden Strömen.

Die Grenzleistungen  $\mu$  der Trichter 1 und 2 werden durch die Ressource Gabelstapler und die von Trichter 3 durch die zur Verfügung stehende Ressource an abgehenden LKW bestimmt. Eine Steuerung kann über eine Änderung der zugewiesenen Ressourcen erfolgen. Dadurch kann die Ressourcenverteilung über entsprechende Regeln dem Prozessverlauf angepasst werden. Im Modell können beliebige Steuerungsstrategien abgebildet und verglichen werden.

In jedem Simulationsschritt werden für jeden Trichterkanal sequentiell die in Tabelle 5.1 dargestellten Modellvariablen berechnet. Das ausführliche Vorgehen für die Berechnung der Variablen an den mesoskopischen Modellelementen wurde in Abschnitt 4.6 beschrieben.

In Abbildung 5.4 sind die Bestandsverläufe im Wareneingang und Warenausgang für die drei beschriebenen Strategien der Ressourcenverteilung dargestellt. Man kann sehen, dass

Tabelle 5.1: Modellvariablen

Modellvariable	Beschreibung
$S(t_i)$	Anfangsbestand zu Beginn des Intervalls $\Delta t$ an den Trichterkanälen
$C^{in}[t_i, t_i + \Delta t]$	Produktmenge, die im Laufe des Intervalls $\Delta t$ im Eingangsstrom eines Trichterkanals erfasst wurde
$\mu(t_i)$	Über das Steuermodul zugewiesene Grenzleistung an den Trichterkanälen für das Intervall $\Delta t$
$C^{out}[t_i, t_i + \Delta t]$	Produktmenge, die im Laufe des Intervalls $\Delta t$ im Ausgangsstrom eines Trichterkanals erfasst wurde

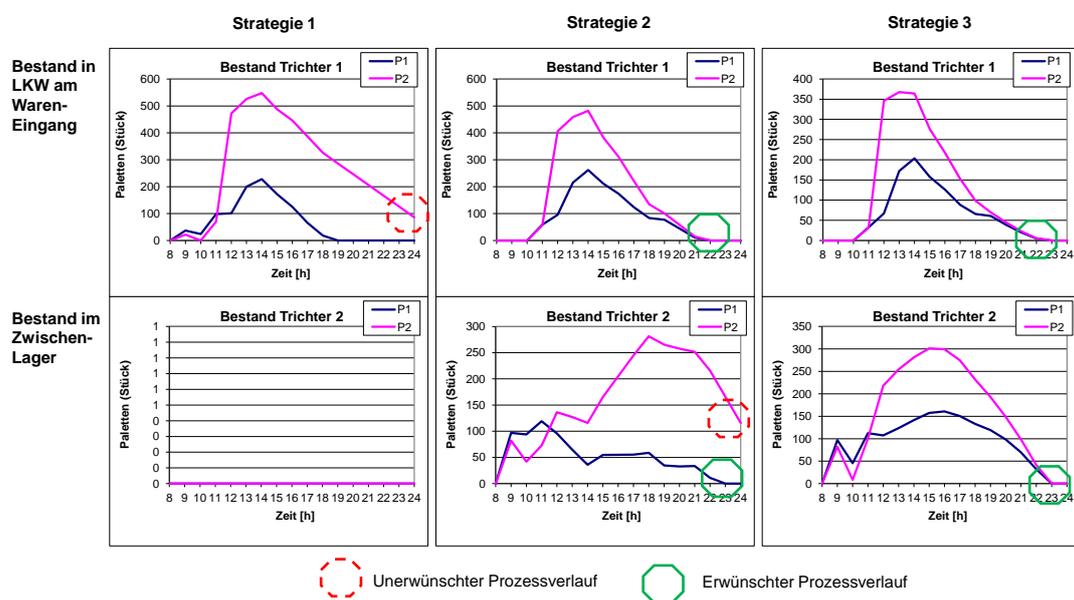


Abbildung 5.4: Bestandsverläufe am Wareneingang und im Zwischenlager

Strategie 3 am besten ist, da dort alle ankommenden Waren am gleichen Arbeitstag umgeschlagen werden können. Bei Strategie 1 bleiben Bestände im Wareneingang (Trichter 1) und bei Strategie 2 im Zwischenlager (Trichter 2) bestehen.

### 5.2.2 Ableitung von Maßnahmen bei Störungen logistischer Prozesse

In diesem Beispiel wird ein Montageprozess abgebildet, bei dem aus zwei verschiedenen Komponenten ein Endprodukt montiert wird. Für 1 Endprodukt werden 3 Einheiten von Komponente A und 1 Einheit von Komponente B benötigt. Bei normaler Taktzeit werden 25 Endprodukte pro Stunde montiert. Der Montageprozess läuft in zwei Schichten von 5:00 Uhr bis 13:00 Uhr und von 14:00 Uhr bis 22:00 Uhr ab.

Der Versand der fertigen Produkte erfolgt nur in der zweiten Schicht und mit einer maxi-

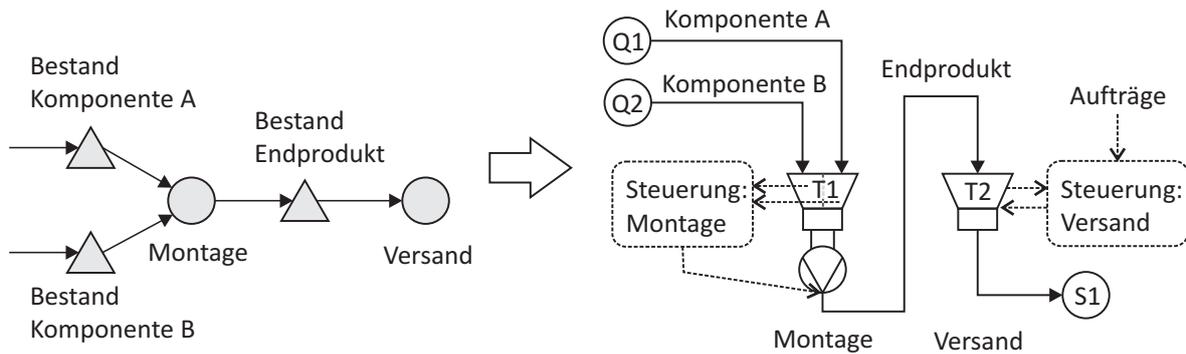


Abbildung 5.5: Mesoskopische Modellbildung

malen Intensität von 50 Endprodukten/h. Die Intensitäten der Eingangsflüsse an der Produktionsstätte für die Komponenten A und B sind bekannt. Sowohl für die Komponenten A und B als auch für die Endprodukte sind Pufferplätze vorgesehen. Der Anfangsbestand beträgt 300 Teile für Komponente A und 200 Teile für Komponente B. In Abbildung 5.5 ist die Umwandlung der realen Systemstruktur in ein mesoskopisches Modell illustriert.

Die Diagramme in Abbildung 5.6 entsprechen einem idealen Betrieb ohne Störung. Es werden 2 Tage (48 Stunden) simuliert. Die Eingangsflüsse für die Komponenten A und B sind wie folgt:

- Komponente A
  - von 7:00 Uhr bis 11:00 Uhr mit einer Intensität von 200 Komponenten/h,
  - von 11:00 Uhr bis 15:00 Uhr mit einer Intensität von 100 Komponenten/h;
- Komponente B
  - zwischen 7:00 Uhr und 8:00 Uhr eine Lieferung mit 150 Komponenten, abgebildet als Intensität mit 150 Komponenten/h,
  - zwischen 16:00 Uhr und 17:00 Uhr eine Lieferung mit 250 Komponenten, abgebildet als Intensität mit 250 Komponenten/h.

Bei einem ungestörten Betrieb verlassen täglich genau 400 Endprodukte den Versand, wie in Abbildung 5.6 zu sehen ist.

Abbildung 5.7 stellt dar, wie sich die Prozessabläufe bei folgenden zwei Störungen verhalten:

- Störung 1: Der Beginn der Lieferung von Komponente A verzögert sich am ersten Tag um 3 Stunden, d. h. sie beginnt nicht 7:00 Uhr, sondern erst 10:00 Uhr.
- Störung 2: Die zweite Lieferung für Komponente B verspätet sich am ersten Tag um 6 Stunden, d. h. sie findet zwischen 22:00 Uhr und 23:00 Uhr statt.

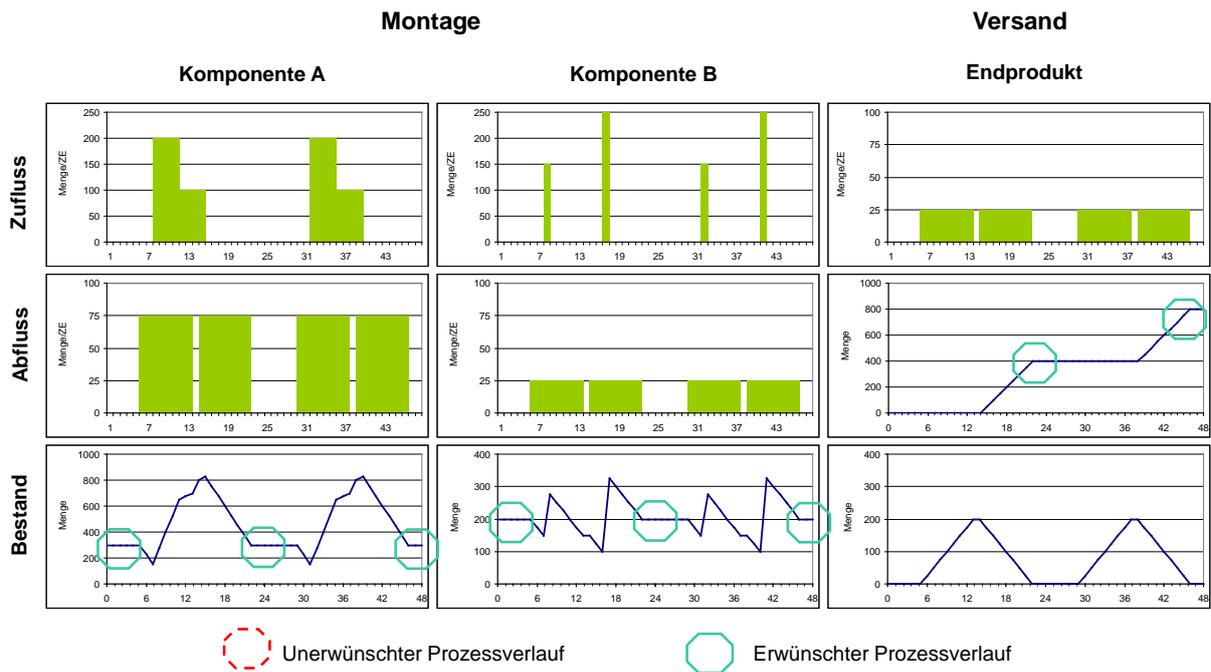


Abbildung 5.6: Ergebnisse der mesoskopischen Simulation bei stabilem Betrieb



Abbildung 5.7: Ergebnisse der mesoskopischen Simulation bei gestörtem Betrieb

Die Folgen dieser Störungen sind:

- Wegen der Out-of-stock-Situation von Komponente A wird von 9:00 Uhr bis 10:00 Uhr nicht montiert.
- Wegen der Out-of-stock-Situation von Komponente B wird von 21:00 Uhr bis 22:00 Uhr nicht montiert.

In der Montage fallen somit 2 Stunden am ersten Tag aus. Die weiteren Folgen sind:

- Die kumulierte Menge im Versand erreicht am zweiten Tag nur 750 Endprodukte und nicht 800 wie geplant.
- Die nicht verbrauchten Komponenten erhöhen die jeweiligen Pufferbestände.

In Abbildung 5.8 sind beispielhaft operative Maßnahmen abgebildet, die zur vollständigen Kompensation beider Störungen führen:

- Die erste Montageschicht wird an beiden Tagen bis 14:00 Uhr verlängert, so dass die Pausenzeit zwischen den Schichten wegfällt.
- Eine zusätzliche Lieferung (z. B. mit einem Eiltransport) mit 25 Stück von Komponente B erfolgt zwischen 16:00 Uhr und 17:00 Uhr, da ansonsten noch eine Stunde Montagezeit am ersten Tag verloren gehen würde.
- Die Schicht im Versand wird am zweiten Tag um 1 Stunde verlängert.

Das angeführte Beispiel demonstriert die Vorteile der mesoskopischen Simulation:

- eine einfache und anschauliche Darstellung von Prozessen,
- eine einfache Umsetzung von Änderungen am Modell und
- ein geringer Berechnungsaufwand.

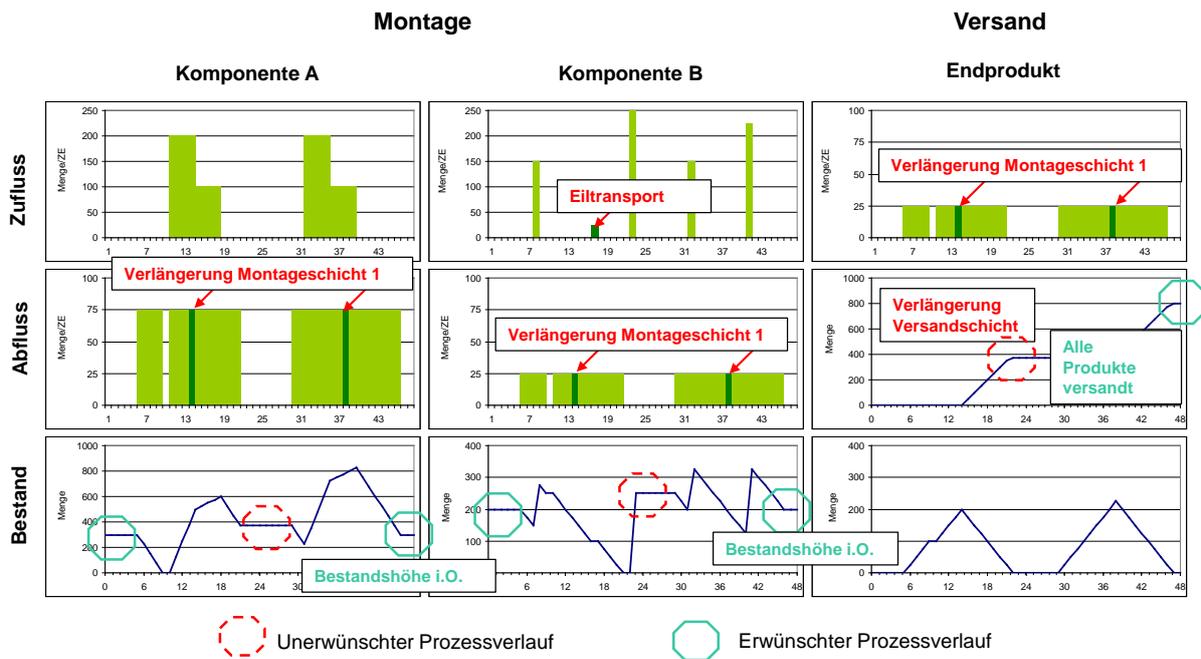


Abbildung 5.8: Ergebnisse der mesoskopischen Simulation nach Umsetzung von Notfallmaßnahmen

### 5.3 Zusammenfassung

Am Anfang dieses Abschnittes wurde kurz auf den entwickelten mesoskopischen Simulator eingegangen, der eine direkte und einfache Implementierung mesoskopischer Modelle ermöglicht. Anschließend wurde an zwei Beispielen gezeigt, dass logistische Analyse- und Planungsaufgaben mit dem mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatz einfach und schnell gelöst werden können. Aufgrund der schnellen Modellberechnung kann der mesoskopische Ansatz sowohl in der Planungsphase als auch während der Betriebsphase eingesetzt werden. Während der Betriebsphase ist eine Kopplung mit Online-Steuerungen und Event-Management-Systemen denkbar.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Modellierungs- und Simulationsansatz entwickelt, der für die schnelle Lösung von mesoskopischen Analyse- und Planungsaufgaben in Produktions- und Logistiksystemen geeignet ist. Er kann deshalb sowohl in der Planungsphase als auch in der Betriebsphase eingesetzt werden. Der entwickelte mesoskopische Modellierungs- und Simulationsansatz ordnet sich in Bezug auf die Abbildungsgenauigkeit logistischer Flussprozesse zwischen mikroskopischen ereignisdiskreten und makroskopischen kontinuierlichen Ansätzen ein und hilft, die Lücke zwischen ihnen zu schließen. Zusammen mit dem ebenfalls entwickelten mesoskopischen Simulator ergänzt er den existierenden Methoden- und Werkzeugsatz der Simulation für die Untersuchung logistischer Flusssysteme.

Mesoskopische Modelle operieren mit Mengen von Objekten, die zu einer logischen Gruppe gehören (z. B. zu einer Charge, einem Los, einer Ladung, einer Lieferung, einem Auftrag oder einer Personengruppe) und nicht mit einzelnen Flussobjekten. Logistikprozesse werden auf einer aggregierten mesoskopischen Ebene dargestellt.

Ein mesoskopisches Modell besitzt hybride Eigenschaften:

- Logistische Flüsse werden wie in der kontinuierlichen flussbasierten Simulation durch Flussraten beschrieben.
- Für die Bestandsgrößen können aufgrund ihrer linearen Entwicklung zukünftige Ereignisse geplant werden. Weiterhin können mesoskopische Modelle impulsförmige Produktflüsse wie in der objektbasierten ereignisdiskreten Simulation nutzen.

In der Arbeit wurde gezeigt, dass der mesoskopische Modellierungs- und Simulationsansatz die an ihn gestellten Anforderungen erfüllt. Er gewährleistet eine schnellere Modellierung und Simulation als mit ereignisdiskreten Modellen, eine genauere Abbildung logistischer Flussprozesse als mit kontinuierlichen Modellen und eine einfache Modellerstellung.

Durch die flussratenbasierte Beschreibung logistischer Flussprozesse in mesoskopischen Simulationsmodellen wird eine schnellere Modellierung und Simulation als in objektbasierten ereignisdiskreten Modellen erreicht.

Da der mesoskopische Ansatz auf den Mechanismen der Discrete-Rate-Simulation basiert, kann der zeitliche Verlauf linearer kontinuierlicher Flussprozesse ereignisbasiert berechnet werden. Das führt zu einer höheren Genauigkeit und schnelleren Modellberechnung als mit kontinuierlichen Modellen. Steuerungen der logistischen Prozesse können

aufgrund der Ereignisplanung für lineare Flussprozesse im Vergleich zur kontinuierlichen Simulation zeitlich exakt abgebildet werden.

Weiterhin verwendet der mesoskopische Ansatz eine einfache Form der Abbildung von Flussprozessen (Flüsse mit stückweise konstanten Raten und impulsförmigen Ereignissen), die für viele logistische Prozesse auf einer mesoskopischen Ebene geeignet ist. Zur Erhöhung der Abbildungsgenauigkeit der flussbasierten Modellierung können mesoskopische Simulationsmodelle Produkttypen und Produktportionen sowie impulsförmige Flüsse verwenden. Die mesoskopischen Modellelemente erlauben eine Abbildung beliebiger Strukturen und Prozesse logistischer Flusssysteme. Das zentrale Modellelement ist ein mehrkanaliger Trichter, der die parallele Bearbeitung verschiedener logistischer Flüsse ermöglicht. Weiterhin können beliebige Steuerungsstrategien implementiert werden. Die Entwicklung eines mesoskopischen Simulators im Rahmen dieser Arbeit unterstützt eine einfache und direkte Implementierung mesoskopischer Simulationsmodelle.

Die Grenzen des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes liegen in seiner beschränkten Abbildungsgenauigkeit. Er ist nicht für Aufgabenstellungen geeignet, deren Bearbeitung eine Betrachtung einzelner Flussobjekte notwendig macht, wie zum Beispiel bei Reihenfolgeuntersuchungen.

Es sind eine Reihe von weiterführenden Arbeiten in Verbindung mit dem entwickelten mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatz denkbar, von denen hier einige beispielhaft aufgezählt werden:

- Der mesoskopische Modellierungs- und Simulationsansatz bietet sich für eine Integration in Konzepte zur Online-Planung, Online-Steuerung und Online-Optimierung logistischer Netzwerke an, da er eine schnelle Modellierung und Simulation ermöglicht.
- Auch eine Integration in Konzepte des Logistics-Event-Management, wie z. B. von [Brandau u. Tolujew 2010], ist vorstellbar. Das Logistics Event Management System kann auf Basis relevanter Ereignisse neue Simulationsläufe anstoßen, die das zukünftige Verhalten des Logistiksystems vorhersagen und bei Störungen oder anderen Veränderungen die Untersuchung von alternativen Steuerungs- und Systemvarianten unterstützen.
- Zukünftig ist auch ein automatisiertes Ableiten von Steuerungsstrategien mit dem mesoskopischen Ansatz denkbar. Aufgrund der schnellen Simulation können in einer kurzen Zeit viele verschiedene Alternativen durchgespielt und die für die vorliegenden Logistikprozesse günstigsten Alternativen ausgewählt werden.
- Die Phase der konzeptionellen Modellierung kann durch die Entwicklung von geeigneten Referenzmodellen unterstützt werden. Eine erste Arbeit gibt es dazu von

[Kaiser 2010]. Darauf aufbauend können weitere Referenzmodelle entwickelt werden, um eine einfache und schnelle Anwendung des mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsansatzes zu ermöglichen.

- Die Erstellung eines Handlungsleitfadens für die mesoskopische Modellierung vereinfacht die Modellerstellung weiter. Zusätzlich ist noch ein Leitfaden denkbar, der den potenziellen Anwender bei der Entscheidung unterstützt, ob der mesoskopische Modellierungs- und Simulationsansatz für eine vorliegende Aufgabenstellung geeignet ist.
- Es muss angestrebt werden, eine Vielzahl von mesoskopischen Simulationsmodellen zu erstellen, um noch weitere Erkenntnisse über den mesoskopischen Ansatz zu gewinnen, ihn weiterzuentwickeln und zu verbreiten. Flussbasierte Ansätze sind bisher in der Logistik wenig verbreitet. Durch eine intensive Anwendung kann der mesoskopische Ansatz dazu beitragen, eine Brücke zwischen den ereignisdiskreten und flussbasierten Ansätze zu schlagen.
- Es sollten Überlegungen angestellt werden, inwieweit der entwickelte Ansatz auf Aufgabenstellungen außerhalb der Logistik übertragbar ist.



---

## Literaturverzeichnis

- Angerhofer, B. J., Angelides, M. C., 2000. System Dynamics Modelling in Supply Chain Management: A Research Review. In: Joines, J. A., Barton, R. R., Kang, K., Fishwick, P. A. (Hrsg.) *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 342–351.
- Arnold, D., Furmans, K., 2007. *Materialfluss in Logistiksystemen*. Springer, Berlin.
- ASIM, 1997. *Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik*. Arbeitsgemeinschaft Simulation in der Gesellschaft für Informatik: Mitteilungen aus den Fachgruppen, Heft 58.
- Banks, J., 2005. *Discrete-event system simulation*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Banks, J., Carson II, J. S., Nelson, B. L., Nicol, D. M., 2009. *Discrete-event system simulation*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle.
- Baumgarten, H., 2004. Trends in der Logistik. In: Baumgarten, H., Darkow, I. L., Zadek, H. (Hrsg.) *Supply Chain Steuerung und Services – Logistik-Dienstleister managen globale Netzwerke – Best Practices*, Springer, Berlin, S. 1–11.
- Bechte, W., 1984. *Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung*. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Borshchev, A., Filippov, A., 2004. From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. In: *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society*, Oxford.
- Bossel, H., 1994. *Modellbildung und Simulation*. Vieweg, Braunschweig.
- Bossel, H., 2004. *Systeme, Dynamik, Simulation*. Books on Demand, Norderstedt.
- Brandau, A., Tolujew, J., 2010. Logistics Event Management. In: Dobroka, M. (Hrsg.) *Ta- gungsband microCAD 2010 International Scientific Conference*, University of Miskolc, Miskolc, S. 7–12.

- Brannolte, U., 1999. Simulationsmodelle im Verkehrswesen – Erreichter Entwicklungsstand und Perspektiven. In: Hohmann, G. (Hrsg.) *Tagungsband 13. Symposium Simulationstechnik*, SCS International, San Diego, S. 21–28.
- Bretzke, W. R., 2008. *Logistische Netzwerke*. Springer, Berlin.
- Burghout, W., 2005. *Mesoscopic Simulation Models for Short-Term Prediction. PRE-DIKT project report*. Center for Traffic Research, Stockholm.
- Buzacott, J. A., Yao, D. D., 1986. Flexible Manufacturing Systems: A Review of Analytical Models. *Management Science*, 32 (7), S. 890–905.
- Cellier, F. E., 1986. Combined Continuous/Discrete Simulation Applications, Techniques, and Tools. In: Wilson, J., Henriksen, J., Roberts, S. (Hrsg.) *Proceedings of the 1986 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 24–33.
- Cellier, F. E., 1991. *Continuous System Modeling*. Springer, New York.
- Cellier, F. E., Kofman, E., 2005. *Continuous System Simulation*. Springer, New York.
- Coyle, R. G., 1977. *Management System Dynamics*. Wiley, New York.
- Coyle, R. G., 1985. Representing Discrete Events in System Dynamics Models: A Theoretical Application to Modelling Coal Production. *The Journal of the Operational Research Society*, 36 (4), S. 307–318.
- Csanady, K., Braun, B., Bockel, B., Wenzel, S., 2008. Methodik zur systematischen Informationsgewinnung für Simulationsstudien - Method for a Systematic Information Acquisition for Simulation Studies. In: Rabe, M. (Hrsg.) *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, S. 595–604.
- Damiron, C., Nastasi, A., 2008. Discrete Rate Simulation Using Linear Programming. In: Mason, S. J., Hill, R. R., Mönch, L., Rose, O., Jefferson, T., Fowler, J. W. (Hrsg.) *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 740–749.
- D'Angelo, H., Caramanis, M., Finger, S., Mavretic, A., Phillis, Y. A., Ramsden, E., 1988. Event-driven Model of unreliable Production Lines with Storage. *International Journal of Production Research*, 26 (7), S. 1173–1182.
- DIN19226, 1994. *Leittechnik: Regelungstechnik und Steuerungstechnik – Teil 1: Allgemeine Grundbegriffe*. Beuth Verlag, Berlin.

- Dobler, M., Saler, M., März, L., 2008. Verteilen von nebenläufigen Simulationsläufen über eine Service-orientierte Netzwerkstruktur. In: Rabe, M. (Hrsg.) *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, S. 509–517.
- Domschke, W., Drexl, A., 2005. *Einführung in Operations Research*. Springer, Berlin.
- Duden, 2006. *Duden*. Dudenverlag Bibliographisches Institut, Mannheim.
- Feldmann, K., Reinhart, G., 2000. *Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion*. Springer, Berlin.
- Filmer, P., Marcondes, J., Johnston, R., 1994. Simulation of high-speed Packaging Lines. *Packaging Technology Science*, 7 (3), S. 123–130.
- Fishman, G. S., 2001. *Discrete-Event Simulation*. Springer, New York.
- Fleischmann, B., 2008. Grundlagen: Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse – Begriffliche Grundlagen. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H., Furmans, K. (Hrsg.) *Handbuch Logistik*, Springer, Berlin, S. 3–12.
- Fleischmann, B., Meyr, H., Wagner, M., 2002. Advanced Planning. In: Stadtler, H., Kilger, C. (Hrsg.) *Supply Chain Management and advanced Planning – Concepts, Models, Software and Case Studies*, Springer, Berlin, S. 71–96.
- Florian, M., Mahut, M., Tremblay, N., 2001. A Hybrid Optimization-mesoscopic Simulation Dynamic Traffic Assignment Model. In: *2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Oakland, S. 118–121.
- Forrester, J. W., 1961. *Industrial Dynamics*. Productivity Press, Wiley, Cambridge.
- Förster, A., 1983. *Strukturierung von Teileflußsystemen der Fertigung im Maschinenbau*. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt.
- Frank, M., 1999. Modellierung und Simulation – Terminologische Probleme. In: Biethahn, J., Hummeltenberg, W., Schmidt, B., Stähly, P., Witte, T. (Hrsg.) *Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe – State of the Art und neuere Entwicklungen*, Physica-Verlag, Heidelberg, S. 50–64.
- Frank, M., Lorenz, P., 1979. *Simulation diskreter Prozesse*. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- Furmans, K., 2008. Bedientheoretische Modellierung logistischer Systeme. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H., Furmans, K. (Hrsg.) *Handbuch Logistik*, Springer, Berlin, S. 57–73.

- Gottschalk, E., 1989. *Rechnergestützte Produktionsplanung und -steuerung*. Verlag Technik, Berlin.
- Großeschallau, W., 1984. *Materialflußrechnung*. Springer, Berlin.
- Größler, A., 2007. System Dynamics zur Strategiesimulation im Produktionsmanagement. In: Specht, D. (Hrsg.) *Strategische Bedeutung der Produktion – Tagungsband der Herbsttagung 2006 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB*, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, S. 73–87.
- Gudehus, T., 2005. *Logistik*. Springer, Berlin.
- Günther, H.-O., Mattfeld, D. C., Suhl, L., 2007. *Management logistischer Netzwerke*. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Haberfellner, R., Daenzer, W. F., 2002. *Systems Engineering*. Verlag Industrielle Organisation, Zürich.
- Hanisch, A., Tolujew, J., Richter, K., Schulze, T., 2003. Online Simulation of Pedestrian Flow in Public Buildings. In: Chick, S., Sánchez, P. J., Ferrin, D., Morrice, D. J. (Hrsg.) *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 1635–1641.
- Hartberger, H., 1991. *Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme*. Springer, Berlin.
- Heidenblut, V., ten Hompel, M., 2006. *Taschenlexikon Logistik*. Springer, Berlin.
- Helber, S., 2008. Konfigurationsplanung. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H., Furmans, K. (Hrsg.) *Handbuch Logistik*, Springer, Berlin, S. 109–137.
- Henderson, S. G., Biller, B., Hsieh, M.-H., Shortle, J., Tew, J. D., Barton, R. R., 2007. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway.
- Hömberg, K., Hustadt, J., Jodin, D., Kochsiek, J., Nagel, L., Riha, I., 2007. *Basisprozesse für die Modellierung in großen Netzen der Logistik*. Universität Dortmund, Dortmund.
- Homburg, C., 1998. *Quantitative Betriebswirtschaftslehre*. Gabler, Wiesbaden.
- Hoyer, R., 1999. Modellgestützte Bewertung eines städtischen Verkehrsleitsystems. In: Hohmann, G. (Hrsg.) *Tagungsband 13. Symposium Simulationstechnik*, SCS International, San Diego, S. 201–206.
- Illés, B., Glistau, E., Coello Machado, N., 2007. *Logistik und Qualitätsmanagement*. University of Miskolc.

- Imagine-That, 2007. *ExtendSim User Guide*. Imagine That Inc.
- Jünemann, R., Schmidt, T., 2000. *Materialflußsysteme*. Springer, Berlin.
- Kaiser, A., 2010. *Entwicklung von Referenzmodellen der mesoskopischen Simulation für Produktions- und Logistiksysteme*. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P., Swets, N. B., 2010. *Simulation with Arena*. McGraw-Hill, Boston.
- Koether, R., 2004. Logistik als Managementaufgabe. In: Koether, R., Augustin, S. (Hrsg.) *Taschenbuch der Logistik*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, München, S. 21–36.
- Kofman, E., 2003. *Discrete Event Based Simulation and Control of Continuous Systems*. Universidad Nacional de Rosario, Rosario.
- Kosturiak, J., Gregor, M., 1995. *Simulation von Produktionssystemen*. Springer, Wien.
- Kouikoglou, V. S., Phillis, Y. A., 1991. An Exact Discrete-Event Model and Control Policies for Production Lines with Buffers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 36 (5), S. 515–527.
- Kouikoglou, V. S., Phillis, Y. A., 1997. A Continuous Flow Model for Production Networks with Finite Buffers, Unreliable Machines, and Multiple Products. *International Journal of Production Research*, 35 (2), S. 381–397.
- Kouikoglou, V. S., Phillis, Y. A., 2001. *Hybrid Simulation Models of Production Networks*. Kluwer Academic Plenum Publishers, New York.
- Krahl, D., 2007. ExtendSim 7. In: Henderson, S. G., Biller, B., Hsieh, M. H., Shortle, J., Tew, J. D., Barton, R. R. (Hrsg.) *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 226–232.
- Krahl, D., 2008. ExtendSim 7. In: Mason, S. J., Hill, R. R., Mönch, L., Rose, O., Jefferson, T., Fowler, J. W. (Hrsg.) *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 215–221.
- Krahl, D., 2009. ExtendSim Advanced Technology: Discrete Rate Simulation. In: Rossetti, M. D., Hill, R. R., Johansson, B., Dunkin, A., Ingalls, R. G. (Hrsg.) *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 333–338.
- Kramer, U., Neculau, M., 1998. *Simulationstechnik*. Hanser, München.

- Krampe, H., 1990. *Transport, Umschlag, Lagerung*. Fachbuchverlag, Leipzig.
- Krampe, H., Lucke, H. J., 2006a. Einführung in die Logistik. In: Krampe, H., Lucke, H. J. (Hrsg.) *Grundlagen der Logistik – Theorie und Praxis logistischer Systeme*, Huss-Verlag, München, S. 17–31.
- Krampe, H., Lucke, H. J., 2006b. *Grundlagen der Logistik – Theorie und Praxis logistischer Systeme*. Huss-Verlag, München.
- Krampe, H., Lucke, H. J., Ziems, D., 2006. Grundlagen der Planung logistischer Systeme. In: Krampe, H., Lucke, H. J. (Hrsg.) *Grundlagen der Logistik – Theorie und Praxis logistischer Systeme*, Huss-Verlag, München, S. 55–95.
- Kuhn, A., Hellgrath, B., 2002. *Supply Chain Management*. Springer, Berlin.
- Kuhn, A., Rabe, M., 1998. *Simulation in Produktion und Logistik*. Springer, Berlin.
- Law, A. M., Kelton, W., 2007. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, Boston.
- Liebl, F., 1995. *Simulation*. Oldenbourg, München.
- Lödging, H., 2008. *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Springer, Berlin.
- Lorenz, W., 1984. *Entwicklung eines arbeitsstundenorientierten Warteschlangenmodells zur Prozeßabbildung der Werkstattfertigung*. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Lucke, H.-J., 2006. Systemtheoretische Grundlagen der Logistik. In: Krampe, H., Lucke, H.-J. (Hrsg.) *Grundlagen der Logistik - Theorie und Praxis logistischer Systeme*, Huss-Verlag, München, S. 35–54.
- Lyneis, J. M., 1980. *Corporate Planning and Policy Design - A System Dynamics Approach*. MIT Press, Cambridge.
- Marthaler, D., Armbruster, D., Ringhofer, C., 2003. A Mesoscopic Approach to the Simulation of Semiconductor Supply Chains. *Simulation*, 79 (3), S. 157–162.
- Mason, S. J., Hill, R. R., Moench, L., Rose, O., 2008. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway.
- Merkuryev, Y., Guasch, A., Merkuryeva, G., Piera, M. A., 2009. *Simulation-Based Case Studies in Logistics*. Springer, London.
- Nyhuis, P., Wiendahl, H. P., 2007. Ansätze einer Logistiktheorie. In: Hausladen, I. (Hrsg.) *Management am Puls der Zeit – Strategien, Konzepte und Methoden*, TCW Transfer-Centrum, München.

- Page, B., 1991. *Diskrete Simulation*. Springer, Berlin.
- Pfohl, H.-C., 2004. *Logistikmanagement*. Springer, Berlin.
- Pfohl, H.-C., 2010. *Logistiksysteme*. Springer, Berlin.
- Phelps, R. A., Parsons, D. J., Siprelle, A. J., 2000. The SDI Industry Product Suite: Simulation from the Production Line to the Supply Chain. In: Joines, J. A., Barton, R. R., Kang, K., Fishwick, P. A. (Hrsg.) *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 208–214.
- Phelps, R. A., Parsons, D. J., Siprelle, A. J., 2001. SDI Supply Chain Builder: Simulation from Atoms to the Enterprise. In: Peters, B. A., Smith, J. S., Medeiros, D. J., Rohrer, M. W. (Hrsg.) *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 246–249.
- Phelps, R. A., Parsons, D. J., Siprelle, A. J., 2002. Non-item Based Discrete-event Simulation Tools. In: Yücesan, E., Chen, C. H., Snowdon, J. L., Charnes, J. M. (Hrsg.) *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 182–186.
- Pritsker, A. A. B., 1995. *Introduction to simulation and SLAM II*. Wiley, New York.
- Rabe, M., 2008. *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Reggelin, T., 2008. A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation and its Application for a Logistics Hub. In: *Elektronischer Tagungsband zur Internationalen Maschinenbaukonferenz Comec 2008*, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara.
- Reggelin, T., Tolujew, J., 2008a. Mesoscopic Modeling and Simulation of Logistics Systems. In: Illes, B., Szkutnik, J., Telek, P. (Hrsg.) *Advanced Logistics Systems - Theory and Practice*, University of Miskolc, Miskolc, S. 21–28.
- Reggelin, T., Tolujew, J., 2008b. Mesoskopische Modellierung am Beispiel eines logistischen Netzwerkes. In: Inderfurth, K., Neumann, G., Schenk, M., Wäscher, G., Ziem, D. (Hrsg.) *Netzwerklogistik - 13. Magdeburger Logistik-Tagung – Logistik aus technischer und ökonomischer Sicht*, Logisch GmbH, Magdeburg, S. 191–204.
- Reinhart, G., Feldmann, K., 1997. *Simulation*. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München.

- Rossetti, M. D., Hill, R. R., Johansson, B., Dunkin, A., Ingalls, R. G., 2009. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway.
- Schenk, M., 2003. *Skript zur Vorlesung Logistikprozesse und -systeme*. Institut für Logistik und Materialflusstechnik der Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg.
- Schenk, M., Müller, E., Wirth, S., 2010a. *Factory Planning Manual*. Springer, Berlin.
- Schenk, M., Tolujew, J., Reggelin, T., 2007. Mesoskopische Modellierung und Simulation von Flusssystemen. In: Ivanov, D., Müller, E., Lukinsky, V. (Hrsg.) *Logistics Collaboration DR-LOG 07*, Publishing House of the Saint Petersburg State Polytechnical University, Sankt Petersburg, S. 40–49.
- Schenk, M., Tolujew, J., Reggelin, T., 2008a. A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation of Logistics Networks. In: Ivanov, D., Jahns, C., Straube, F., Procenko, O., Sergeev, V. (Hrsg.) *Logistics and Supply Chain Management: Trends in Germany and Russia*, State Polytechnical University, Sankt Petersburg, S. 58–67.
- Schenk, M., Tolujew, J., Reggelin, T., 2008b. Mesoskopische Modellierung für die schnelle und aufwandsarme Planung und Steuerung robuster und sicherer Logistiksysteme. In: Pfohl, H.-C., Wimmer, T. (Hrsg.) *Robuste und sichere Logistiksysteme – 4. BVL-Wissenschaftssymposium Logistik*, DVV Media Group, Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, S. 263–292.
- Schenk, M., Tolujew, J., Reggelin, T., 2008c. Mesoskopische Simulation von Flusssystemen – algorithmisch steuern und analytisch berechnen. In: Nyhuis, P. (Hrsg.) *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*, Springer, Berlin, S. 463–485.
- Schenk, M., Tolujew, J., Reggelin, T., 2009a. Comparison of Three Methods of Implementation of Mesoscopic Flow Models. In: Ivanov, D., Meinberg, U. (Hrsg.) *Logistics and Supply Chain Management: Modern Trends in Germany and Russia*, Cuvillier Verlag, Göttingen, S. 36–44.
- Schenk, M., Tolujew, J., Reggelin, T., 2009b. Mesoscopic Modeling and Simulation of Logistics Networks. In: IFAC (Hrsg.) *Preprints of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Moskau.
- Schenk, M., Tolujew, J., Reggelin, T., 2010b. A Mesoscopic Approach to the Simulation of Logistics Systems. In: Dangelmaier, W., Blecken, A., Delius, R., Klöpfer, S. (Hrsg.) *Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics*, Springer, Berlin, S. 15–25.
- Schenk, M., Tolujew, J., Reggelin, T., 2010c. Solutions for Resource Allocation Problems in Mesoscopic Flow Models. In: Ivanov, D. A., Lukinskiy, V. S., Sokolov, B. V., Käschel,

- J. (Hrsg.) *Logistik und Supply Chain Management: Deutsch-Russische Perspektiven*, Publishing House of the Saint Petersburg State Polytechnical University, S. 78–88.
- Schenk, M., Wirth, S., 2004. *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*. Springer, Berlin.
- Schmidt, K., 2002. *Methodik zur integrierten Grobplanung von Abläufen und Strukturen mit digitalen Fabrikmodellen*. RWTH Aachen.
- Schmigalla, H., 1995. *Fabrikplanung*. Hanser, München.
- Scholl, A., 2008. Grundlagen der modellgestützten Planung. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H., Furmans, K. (Hrsg.) *Handbuch Logistik*, Springer, Berlin, S. 35–43.
- Scholz-Reiter, B., de Beer, C., Freitag, M., Hamann, T., Rekersbrink, H., Tervo, J. T., 2008. Dynamik logistischer Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.) *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*, Springer, Berlin, S. 109–138.
- Scholz-Reiter, B., Delhoum, S., Zschintzsch, M., Jagalski, T., Freitag, M., 2006. Inventory Control in Shop Floors, Production Networks and Supply Chains Using System Dynamics. In: Wenzel, S. (Hrsg.) *Simulation in Produktion und Logistik 2006*, SCS Publishing House, Erlangen, S. 273–282.
- Scholz-Reiter, B., Freitag, M., de Beer, C., Jagalski, T., 2005. Modelling Dynamics of Autonomous Logistic Processes: Discrete-event versus Continuous Approaches. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 54 (1), S. 413–416.
- Scholz-Reiter, B., Wirth, F., Freitag, M., Dashkovskiy, S., Jagalski, J., de Beer, C., Ruffer, B., 2007. Mathematical Models of Autonomous Logistic Processes. In: Hülsmann, M., Windt, K. (Hrsg.) *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics – The Impact of Autonomy on Mananagement, Information, Communication and Material Flow*, Springer, Berlin, S. 121–138.
- Schomburg, E., 1980. *Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau*. RWTH Aachen.
- Schöneborn, F., 2004. *Strategisches Controlling mit System Dynamics*. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Schriber, T. J., Brunner, D. T., 2008. Inside Discrete-Event Simulation Software: How it Works and Why it Matters. In: Mason, S. J., Hill, R. R., Mönch, L., Rose, O., Jefferson, T., Fowler, J. W. (Hrsg.) *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 182–192.

- Schulze, T., Horton, G., Preim, B., Schlechtweg, S., 2006. *Simulation und Visualisierung 2006*. SCS Publishing House, Erlangen.
- Schulze, T., Preim, B., Schumann, H., 2007. *Simulation und Visualisierung 2007*. SCS Publishing House, Erlangen.
- Siprelle, A. J., Parsons, D. J., 1995. Modeling a Bulk Manufacturing System Using Extend. In: Tew, J. D., Manivannan, S., Sadowski, D. A., Seila, A. F. (Hrsg.) *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 813–817.
- Siprelle, A. J., Parsons, D. J., Phelps, R. A., 1999. SDI Industry Pro: Simulation for Enterprise-wide Problem Solving. In: Farrington, P. A., Nembhard, H. B., Sturrock, D. T., Evans, G. W. (Hrsg.) *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 241–248.
- Siprelle, A. J., Phelps, R. A., 1997. Simulation of Bulk Flow and High Speed Operations. In: Henderson, S. G., Biller, B., Hsieh, M. H., Shortle, J., Tew, J. D., Barton, R. R. (Hrsg.) *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 706–710.
- Siprelle, A. J., Phelps, R. A., Barnes, M. M., 1998. SDI Industry: An Extend-based Tool for Continuous and High-speed Manufacturing. In: Medeiros, D. J., Watson, E. F., Carson, J. S., Manivannan, M. S. (Hrsg.) *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 349–358.
- Sterman, J. D., 2000. *Business Dynamics*. Irwin McGraw-Hill, Boston.
- Straßburger, S., Seidel, H., Schady, R., Masik, S., 2006. Werkzeuge und Trends der digitalen Fabrikplanung – Analyse der Ergebnisse einer Onlinebefragung. In: Wenzel, S. (Hrsg.) *Simulation in Produktion und Logistik 2006*, SCS Publishing House, Erlangen, S. 391–402.
- Sturrock, D. T., Drake, G. R., 1996. Simulation for High Speed Processing. In: Charnes, J. M., Morrice, D. J., Brunner, D. T., Swain, J. J. (Hrsg.) *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, S. 432–436.
- Tempelmeier, H., 2005. *Material-Logistik*. Springer, Berlin.
- Tolujew, J., Alcalá, F., 2004. A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation of Pedestrian Flows. In: Horton, G. (Hrsg.) *18th European Simulation Multiconference*, SCS International, Ghent, S. 123–128.

- VDI3633, 2000. *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Blatt 1: Grundlagen*. Beuth Verlag, Berlin.
- Ventana-Systems, 2007. *Vensim Reference Manual*. Ventana Systems.
- Wagner, R., 2004. *Stock-Flow-Thinking und Bathtub Dynamics – Eine Theorie von Bestands- und Flussgrößen*. Universität Klagenfurt.
- Wenzel, S., 2000. *Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik*. SCS International, Ghent.
- Wenzel, S., 2006. *Simulation in Produktion und Logistik 2006*. SCS Publishing House, Erlangen.
- Wiendahl, H.-P., 1997. *Fertigungsregelung*. Hanser, München.
- Wirth, S., 1989. *Flexible Fertigungssysteme*. Verlag Technik, Berlin.
- Wittmann, J., 1999. Ein Modellbaukasten zur makroskopischen Verkehrsflussmodellierung unter Berücksichtigung von Quelle-/Zielbeziehungen. In: Hohmann, G. (Hrsg.) *Tagungsband 13. Symposium Simulationstechnik*, SCS International, San Diego, S. 189–194.
- Zeigler, B. P., Praehofer, H., Kim, T. G., 2000. *Theory of Modeling and Simulation*. Academic Press, San Diego.
- Ziems, D., 2004. *Skript zur Vorlesung Technische Logistik*. Institut für Logistik und Materialflusstechnik der Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg.
- Ziems, D., Gueorguiev, M., 1999. *Bedienungs- und Petri-Netz-Modelle in der Materialflussplanung*. Logisch GmbH, Magdeburg.
- Zimmermann, H.-J., 2008. *Operations Research*. Vieweg, Wiesbaden.
- Zimmermann, W., Stache, U., 2001. *Operations Research*. Oldenbourg, München.

## Abstrakt

Simulationsmodelle sind ein wichtiges Hilfsmittel bei Planung, Realisierung und Betrieb logistischer Flusssysteme, da sie das dynamische Systemverhalten abbilden können.

Die im Bereich der Logistik verbreiteten ereignisdiskreten Simulationsmodelle sind oft mit einem hohen Aufwand für Modellerstellung und -berechnung verbunden.

Die Arbeit entwickelt und beschreibt deshalb die Grundprinzipien eines neuen Modellierungs- und Simulationsansatzes, der eine schnelle Analyse des dynamischen Verhaltens logistischer Flusssysteme ermöglicht. Hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit logistischer Flussprozesse ordnet sich der entwickelte Ansatz zwischen objektbasierten ereignisdiskreten und flussbasierten kontinuierlichen Modellen ein und wird deshalb als mesoskopischer Modellierungs- und Simulationsansatz bezeichnet.

Im Rahmen der Arbeit wurde weiterhin ein mesoskopischer Simulator für eine direkte Implementierung mesoskopischer Modelle entwickelt. Das mesoskopische Modellierungs- und Simulationskonzept und der mesoskopische Simulator ergänzen den existierenden Methoden- und Werkzeugsatz der Simulation für die Untersuchung logistischer Flusssysteme.

[www.ilm.ovgu.de](http://www.ilm.ovgu.de)

Institut für Logistik und Materialflusstechnik  
Fakultät für Maschinenbau  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

39106 Magdeburg  
Universitätsplatz 2  
Gruson Gebäude (Geb. 10)

Telefon: 0391 - 67 18604  
Telefax: 0391 - 67 12646  
[ilm@ovgu.de](mailto:ilm@ovgu.de)

ISBN: 978-3-940961-63-1