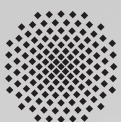
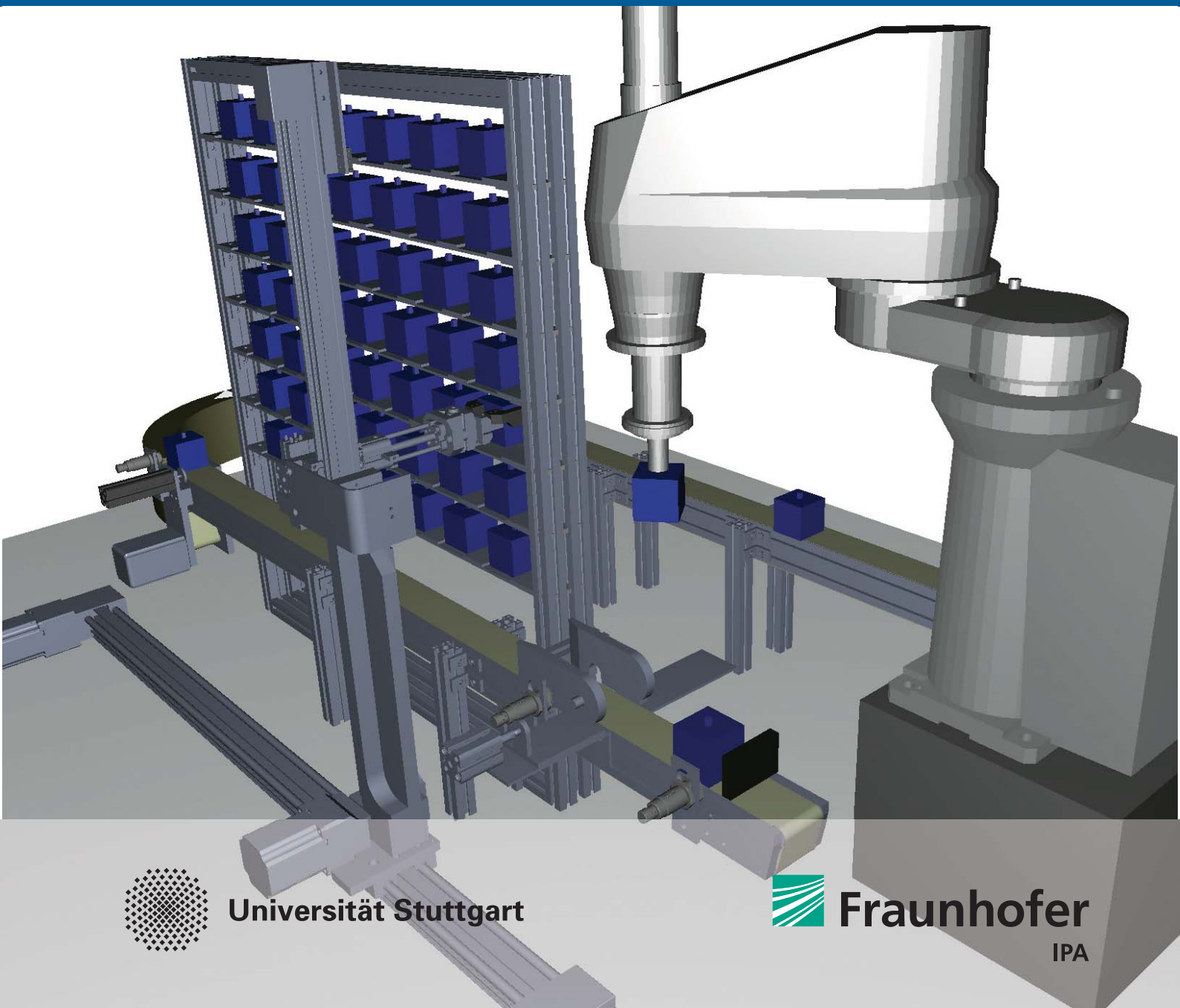


SIMON HOHER

Ein gekoppeltes Materialflussmodell zur durchgängigen Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen



Universität Stuttgart



Fraunhofer
IPA

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Simon Hoher

**Ein gekoppeltes Materialflussmodell zur
durchgängigen Entwicklungsunterstützung
von Materialflusssteuerungen**

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-00, Telefax 07 11 9 70-13 99
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

Titelbild: © Simon Hoher

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-1197-5

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2016

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2017

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

**Ein gekoppeltes Materialflussmodell zur
durchgängigen Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Simon Hoher
aus Sigmaringen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl,
Universität Stuttgart

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Heinz Wehking,
Universität Stuttgart

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Dezember 2016

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart

Kurzfassung

Innerbetriebliche Materialflusssysteme beeinflussen unmittelbar die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. Die Anforderungen an die Materialflussteuerung haben zugleich ein hohes Ausmaß an Komplexität erreicht. Die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß von Ausfällen der Steuerungstechnik durch Softwarefehler stellen ein dominierendes Problem im innerbetrieblichen Materialfluss dar.

Deshalb werden je nach Entwicklungsphase und Zielsetzung neue individuelle und problemspezifische Materialflusssimulationen entworfen, um die Entwicklung des innerbetrieblichen Materialflusssystems abzusichern. Die Kosten, die aufgrund des zusätzlichen Zeitaufwandes für die Erstellung der Simulation entstehen, und diejenigen für die Simulationssoftware amortisieren sich schon nach dem einmaligen Einsatz.

Dennoch ist die Erstellung der individuellen und problemspezifischen Simulationen in den Entwicklungsphasen immer noch sehr zeitaufwändig. Für jede Modellerstellung wird speziell ausgebildetes Fachpersonal benötigt. Ferner können die jeweiligen Simulationsergebnisse nicht direkt für die Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen verwendet werden. Die Modellvalidität – also die Richtigkeit der Simulation für den Einsatzzweck – geht zwischen den jeweiligen Simulationsläufen in den Entwicklungsphasen wegen der neu erstellten Modelle verloren und muss jedes Mal erneut nachgewiesen werden.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, die unterschiedlichen Materialflussmodelle in einem Materialflussmodell zu koppeln. Die Entwicklung der Materialflussteuerung kann dann mit einem einzigen Simulationsmodell und gezielten Simulationsläufen unterstützt werden. Dadurch reduziert sich der Modellerstellungsaufwand erheblich. Außerdem können doppelte Schritte bei der Modellerstellung vermieden werden und die Modellvalidität für bereits erstellte Modelle bleibt erhalten.

Short Summary

Internal material flow systems immediately influence a company's economic efficiency and contestability. At the same time, the requirements of a material flow control have reached a high level of complexity. The probability of occurrence as well as the severity of failure in control engineering through software errors represents a dominant problem within the internal material flow.

Therefore, new individual, problem specific material flow simulations are designed to ensure the development of the internal material flow system. The costs incurred from the additional time spent on the creation of the simulation, and those for the simulation software amortize already after the first use.

However, the creation of individual and problem specific simulations during the development phases is still very time consuming. For each modelling process specifically trained experts are needed. Furthermore, the particular results of the simulation cannot be used directly as an aid to develop material flow controls. In the development phase, the model validity – i.e. the accuracy of the simulation for its purpose of application – is lost after each simulation run because of the newly created models and has to be verified every time.

The aim of the thesis therefore is to couple the different material flow models into one. Thus, the development of a material flow control can be supported with one single simulation model and selective simulation runs. Thereby the efforts for the creation of new models reduces tremendously. Additionally, doublings in the course of the model creation can be avoided and the model validity for already created models is preserved.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
Mathematische Konventionen	x
Kurzfassung	xi
Abstract	xiv
Kapitel 1 Einführung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
Kapitel 2 Grundlagen zu Materialflusssystemen	4
2.1 Innerbetrieblicher Materialfluss	4
2.2 Materialflusselemente: Fördertechnik, Handhabung und Lagertechnik	4
2.3 Materialflussteuerung	6
2.4 Messsysteme	9
2.5 Aktorsysteme	9
Kapitel 3 Stand der Technik	11
3.1 Nutzungsmöglichkeiten von Materialflusssimulation	11
3.2 Anforderungen an die Materialflusssimulation	14
3.2.1 Simulationstechnische Anforderungen	14
3.2.2 Datentechnische Anforderungen	18
3.2.3 Systemtechnische Anforderungen	18
3.3 Materialflussmodelle	19
3.3.1 Kinematische Materialflussmodelle	20
3.3.2 Kinetische Materialflussmodelle	24
3.3.3 Zusammenfassung	31

3.4	Kollisionserkennung.....	31
3.5	Materialflussmodelle im Entwicklungsprozess.....	34
3.6	Gekoppelte Materialflussmodelle.....	37
3.7	Durchgängige Materialflussmodelle.....	39
3.8	Zusammenfassung	40
Kapitel 4	Anforderungsanalyse	41
Kapitel 5	Ein gekoppeltes Materialflussmodell (GMM).....	45
5.1	Modellkopplung.....	45
5.2	Modellbasis.....	46
5.2.1	Physikalisches Ersatzmodell	46
5.2.2	Mathematisches Ersatzmodell	47
5.2.3	Computerrechenbares Simulationsmodell	48
5.3	Kinematische Kollisionsauflösung.....	51
5.3.1	Kollisionen und bleibende Kontakte	52
5.3.2	Fördertechnik	52
5.3.3	Handhabung.....	62
5.3.4	Lagertechnik.....	68
5.3.5	Ungebundene Stückgüter	69
5.3.6	Messsysteme & Identifikationssysteme.....	70
5.3.7	Priorisierung der kinematischen Kollisionsauflösung	70
5.4	Analyse des Laufzeit- und Speicherplatzbedarfs	71
5.5	Zusammenfassung	72
Kapitel 6	Realzeitdeterministische Kollisionserkennung	73
6.1	Realzeitdeterministische Kollisionsprüfung.....	73
6.1.1	Unterscheidungsmerkmale der geometrischen Kollisionsprüfung.....	73
6.1.2	Anforderungen an eine Bibliothek zur Kollisionsprüfung	77

6.1.3	Auswahl möglicher Bibliotheken zur Kollisionsprüfung	77
6.1.4	Bewertung der Kollisionsprüfung.....	79
6.2	Entwurf eines realzeitdeterministischen Hüllkörperverfahrens	91
6.2.1	Algorithmus des Hüllkörperverfahrens	91
6.2.2	Realisierung des Hüllkörperverfahrens	92
6.2.3	Bewertung des Hüllkörperverfahrens	93
6.3	Entwurf eines realzeitdeterministischen Priorisierungsverfahrens.....	98
6.3.1	Algorithmus und Realisierung des Priorisierungsverfahrens.....	98
6.3.2	Bewertung des Priorisierungsverfahrens	99
6.4	Analyse des Laufzeit- und Speicherplatzbedarfs	99
6.4.1	Analyse des Hüllkörperverfahrens	100
6.4.2	Analyse des Priorisierungsverfahrens.....	101
6.4.3	Analyse der Kollisionsprüfung	102
6.5	Zusammenfassung	103
Kapitel 7	Modellierung.....	104
7.1	Blockschaltbildbasierte Modellierung.....	104
7.2	Zusammenfassung	110
Kapitel 8	Realisierung und Anwendung	111
8.1	Computerrechenbares Simulationsmodell	111
8.2	Hochregallagersystem als Vergleichsbasis	113
8.3	Vergleich der Modellierung des GMMs mit dem Stand der Technik	114
8.3.1	Blockschaltbildbasierte Modellierung mit dem GMM.....	114
8.3.2	Blockschaltbildbasierte Modellierung nach dem Stand der Technik.....	117
8.3.3	Zusammenfassung.....	119
8.4	Bewertung des gekoppelten Materialflussmodells	120
8.4.1	Experiment.....	120

8.4.2	Ausreichende Genauigkeit	121
8.4.3	Robustheit.....	124
8.4.4	Speichermanagement	124
8.4.5	Berechnungsdauer und Zeitdeterminismus.....	125
8.4.6	Zusammenfassung.....	127
Kapitel 9	Zusammenfassung.....	128
Kapitel 10	Literaturverzeichnis	132
Kapitel 11	Anhang.....	148
11.1	Vorarbeiten am ISW	148
11.2	Testplattform.....	150

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß durch Fehler in der Materialflussteuerung im Vergleich zu Personal, Fördertechnik und Gebäude.....	2
Abbildung 2:	Beispiel der Hardwarekonfiguration einer Materialflussteuerung nach VDMA-Richtlinie 15276	8
Abbildung 3:	Ablaufschema für die Modellbildung und Simulation	19
Abbildung 4:	Programmablaufplan eines Simulationsschrittes des kinematischen Materialflussmodells	24
Abbildung 5:	Programmablaufplan eines Simulationsschrittes des kinetischen Materialflussmodells	30
Abbildung 6:	Simulationsbasierte Ermittlung des optimalen Layouts in der Angebotsphase mit einem kinematischen Materialflussmodell.....	35
Abbildung 7:	Materialflusssimulation von Transportkörben mit einem kinetischen Materialflussmodell in der Planungsphase zur Identifikation und Optimierung der Steuerungsfunktionen	36
Abbildung 8:	Virtuelle Inbetriebnahme in der Realisierungsphase mit einem kinetischen Materialflussmodell.....	36
Abbildung 9:	Virtuelle Inbetriebnahme mit einem kinematischen Materialflussmodell...	37
Abbildung 10:	Anforderungsanalyse.....	43
Abbildung 11:	Programmablaufplan eines Simulationsschrittes im gekoppelten Materialflussmodell.....	51
Abbildung 12:	Approximation des Geschwindigkeitsfelds an der Objektoberfläche von linearen Stetigförderern mit ebener Lauffläche.....	54
Abbildung 13:	Simulationslauf mit einem Linearförderer mit ebener Lauffläche und 5 Stückgütern	56
Abbildung 14:	Simulationslauf mit Übergang zwischen zwei Linearförderern und einem Stückgut	58
Abbildung 15:	Zwei Simulationsläufe mit Übergang zwischen zwei Linearförderern und einem Stückgut.....	59
Abbildung 16:	Kommissioniertes Stückgut auf einem Förderer und der dazugehörige Kontaktgraph	60

Abbildung 17:	Simulationslauf mit gestapeltem Stückgut	61
Abbildung 18:	Skizze des Simulationsprinzips eines Roboters	62
Abbildung 19:	Simulationslauf mit einem Stückgut zwischen zwei Robotern	64
Abbildung 20:	Einschleusen von Stückgut mit Hilfe von Sperren	65
Abbildung 21:	Simulationslauf mit gestapeltem Stückgut, zwei Linearförderern und einer Sperre.....	66
Abbildung 22:	Gezielte Bewegung von Stückgut mit einem kinematischen Greifsystem	66
Abbildung 23:	Simulationslauf mit einem kinematischen Greifsystem.....	68
Abbildung 24:	Simulationslauf mit einer Lagerzeile und jeweils zwei Stückgütern in Blocklagerung.....	69
Abbildung 25:	Zerlegung eines beliebigen Kollisionsobjektes in konvexe (Unter-)Objekte.....	75
Abbildung 26:	Skizze des Prinzips von Experiment 1 zur Bewertung der Eigenschaften der Bibliotheken zur Kollisionsprüfung.....	80
Abbildung 27:	Skizze des Prinzips der Experimente 2 und 3 zur Bewertung der Eigenschaften der Bibliotheken zur Kollisionsprüfung.....	80
Abbildung 28:	Falsch berechnete Normale mit der Bibliothek VCLIP bei Experiment 1 während der Kombination Kante-Fläche	81
Abbildung 29:	Falsch berechnete Normale mit der Bibliothek SOLID bei Experiment 1 während der Kombination Punkt-Fläche.....	82
Abbildung 30:	Bei der Bestimmung der Kontaktpunkte kommt es teilweise zu kleineren Ungenauigkeiten mit der Bibliothek BULLET SMA, die allerdings immer noch im Toleranzbereich der ausreichenden Genauigkeit liegen.	83
Abbildung 31:	Bei einer Vergrößerung der Objektskalierung um den Faktor 10 in der Bibliothek BULLET SMA werden die Kontaktpunkte deutlich genauer berechnet.	83
Abbildung 32:	Berechnungsdauer der Kollisionsprüfung pro Simulationsschritt aufgetragen über der Simulationszeit bei Experiment 1 für die Bibliotheken BULLET BOX, BULLET EPA, BULLET SMA	88
Abbildung 33:	Berechnungsdauer der Kollisionsprüfung pro Simulationsschritt aufgetragen über der Simulationszeit bei Experiment 2 für die Bibliothek BULLET EPA.....	89

Abbildung 34:	Berechnungsdauer der Kollisionsprüfung pro Simulationsschritt aufgetragen über der Simulationszeit bei Experiment 2 für die Bibliothek BULLET SMA	90
Abbildung 35:	Maximale und durchschnittliche Berechnungsdauer der Kollisionsprüfung pro Simulationsschritt aufgetragen über der Objektdiskretisierung	90
Abbildung 36:	Versuchsanordnung zur Bestimmung der realzeitdeterministischen Berechnungseigenschaften des realisierten Hüllkörperverfahrens.....	94
Abbildung 37:	Berechnungsdauer des realisierten Hüllkörperverfahrens pro Simulationsschritt aufgetragen über der Simulationszeit für 40, 100, 400 und 1000 bewegte Objekte.....	96
Abbildung 38:	Berechnungsdauer des realisierten Hüllkörperverfahrens pro Simulationsschritt aufgetragen über der Simulationszeit für 40 bewegte Objekte und 60, 360 und 960 statische Objekte	97
Abbildung 39:	Berechnungsdauer des realisierten Hüllkörperverfahrens pro Simulationsschritt aufgetragen über der Anzahl an statischen und bewegten Objekten.....	98
Abbildung 40:	Berechnungsdauer des realisierten Priorisierungsverfahrens pro Simulationsschritt aufgetragen über der Anzahl an Kollisionspaaren	99
Abbildung 41:	Modellschaltbild eines Teleskopgurtförderers mit vorgeschalteten Aktorsystemen.....	108
Abbildung 42:	Modellschaltbild eines Teleskopgurtförderers mit nachgeschalteten Messsystemen.....	109
Abbildung 43:	Modellschaltbild eines Identifikationssystems	110
Abbildung 44:	Konzept des erweiterten Simulationswerkzeugs mit dem computerrechenbaren Simulationsmodell und den Materialflussmodellblöcken	112
Abbildung 45:	Perspektivische Seitenansicht und Draufsicht des Hochregallagers	113
Abbildung 46:	Modellierung des Hochregallagers in dem blockschaltbildbasierten Modellierungswerkzeug mit dem GMM. Die einzelnen Materialflusselemente wurden in verschiedenen Subsystemen modelliert.....	115

Abbildung 47:	Modellierung des Subsystems Regalbediengerät mit dem gekoppelten Materialflusssystem inkl. der Verknüpfungen zum Steuerungssystem ...	116
Abbildung 48:	Parametermaske des Greifer-Bausteins.....	117
Abbildung 49:	Modellierung des Hochregallagers in dem blockschaltbildbasierten Modellierungswerkzeug mit einem kinematischen Materialflussmodell nach dem Stand der Technik	118
Abbildung 50:	Modellierung des Subsystems „Regalbediengerät“ mit dem kinematischen Materialflusssystem nach dem Stand der Technik	119
Abbildung 51:	3D-Visualisierung des Hochregallagers mit hochauflösenden CAD-Daten und die vereinfachte 3D-Objektbeschreibung des Hochregallagers im GMM.....	122
Abbildung 52:	Zwei Screenshots während des Simulationslaufs mit dem GMM mit kinematischer Kollisionsauflösung.....	123
Abbildung 53:	Zwei weitere Screenshots während des Simulationslaufs mit dem GMM mit kinematischer Kollisionsauflösung mit fehlerhaften Steuerungsprogrammen.....	124
Abbildung 54:	Berechnungsdauer mit dem GMM pro Simulationsschritt aufgetragen über der Simulationszeit	126
Abbildung 55:	Häufigkeit des periodischen Jitter.....	150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vor- und Nachteile der Nutzungsmöglichkeiten der Materialflusssimulation.	13
Tabelle 2:	Simulationstechnische Anforderungen sortiert unter den Simulationsplattformen aus Kapitel 3.1 und Tabelle 1	18
Tabelle 3:	Materialflussmodelle sortiert unter den Simulationsplattformen aus Kapitel 3.1 und Tabelle 1	31
Tabelle 4:	Laufzeit einer Kollisionserkennung mit der Exhaustionsmethode	33
Tabelle 5:	Entwicklungsphasen sortiert unter den Materialflussmodellen	40
Tabelle 6:	Bewertung der ausreichenden Genauigkeit für ausgewählte Bibliotheken zur Kollisionsprüfung	84
Tabelle 7:	Bewertung der Robustheit für ausgewählte Bibliotheken zur Kollisionsprüfung	85
Tabelle 8:	Bewertung des Speicherbedarfs für ausgewählte Bibliotheken zur Kollisionsprüfung	87
Tabelle 9:	Maximale und durchschnittliche Berechnungsdauer bei Experiment 1	89
Tabelle 10:	Abschließende Bewertung der Berechnungsdauer und des Zeitdeterminismus für die Bibliotheken BULLET BOX, BULLET EPA und BULLET SMA	91
Tabelle 11:	Bewertung des Speicherbedarfs für das realisierte Hüllkörperverfahren in Abhängigkeit der Anzahl an achsparallelen Quadern	95
Tabelle 12:	Symbol und Beschreibung der realisierten Materialflusselemente im GMM	105
Tabelle 13:	Symbol und Beschreibung der realisierten Aktorsysteme im GMM	107
Tabelle 14:	Symbol und Beschreibung der realisierten Sensorsysteme im GMM	109
Tabelle 15:	Benötigte Materialflusselemente und Anzahl an notwendigen 3D- Objektbeschreibungen pro Materialflusselement für den Simulationslauf mit dem GMM	121
Tabelle 16:	Bewertung des Speicherbedarfs für das GMM	125

Mathematische Konventionen

- Variablen werden in kursiver Schrift geschrieben und Zeichen mit konventioneller Bedeutung in geradestehender Schrift.
- Skalare werden durch Normaldruck, Vektoren durch fett gedruckte Kleinbuchstaben und Matrizen durch fett gedruckte Großbuchstaben dargestellt.
- Skalare, Vektoren und Matrizen können unterschiedlichen Objekten zugeordnet sein. Diese Kennzeichnung erfolgt durch ein Hochzeichen links vom Grundzeichen. Den Bezugspunkt bildet immer die euklidische Basis. Ein Paar von Objekten wird durch ein Komma getrennt. (Bsp.: $(^{01, \text{MF}}a)$)

Variable	Bedeutung
x	Skalar
$\boldsymbol{x}$	Vektor
$\boldsymbol{X}$	Matrix
$\boldsymbol{x}^T$	Transponierte des Vektors $\boldsymbol{x}$
$\ \boldsymbol{x}\ $	2-Norm des Vektors $\boldsymbol{x}$
$ x $	Betrag des Skalars x
$^{\text{SG}}\boldsymbol{x}$	Vektor bezogen auf das Objekt Stückgut
$^{\text{SG,ME}}\boldsymbol{x}$	Vektor bezogen auf das Objektpaar Stückgut-Materialflusselement
$\mathcal{A}$	Räume, Mengen oder Bereiche
$\mathbb{R}$	Definitionsbereich
$\boldsymbol{x} \cdot \boldsymbol{y}$	Skalarprodukt der Vektoren $\boldsymbol{x}$ und $\boldsymbol{y}$
$\boldsymbol{x} \times \boldsymbol{y}$	Kreuzprodukt der Vektoren $\boldsymbol{x}$ und $\boldsymbol{y}$

Kurzfassung

Innerbetriebliche Materialflusssysteme beeinflussen unmittelbar die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. Die Anforderungen an die Materialflussteuerung haben zugleich ein hohes Ausmaß an Komplexität erreicht. Die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß von Ausfällen der Steuerungstechnik durch Softwarefehler stellen ein dominierendes Problem im innerbetrieblichen Materialfluss dar.

Deshalb werden je nach Entwicklungsphase und Zielsetzung neue individuelle und problemspezifische Materialflusssimulationen entworfen, um die Entwicklung des innerbetrieblichen Materialflusssystems abzusichern. Die Kosten, die aufgrund des zusätzlichen Zeitaufwandes für die Erstellung der Simulation entstehen, und diejenigen für die Simulationssoftware amortisieren sich schon nach dem einmaligen Einsatz.

Dennoch ist die Erstellung der individuellen und problemspezifischen Simulationen in den Entwicklungsphasen immer noch sehr zeitaufwändig. Für jede Modellerstellung wird speziell ausgebildetes Fachpersonal benötigt. Ferner können die jeweiligen Simulationsergebnisse nicht direkt für die Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen verwendet werden. Die Modellvalidität – also die Richtigkeit der Simulation für den Einsatzzweck – geht zwischen den jeweiligen Simulationsläufen in den Entwicklungsphasen wegen der neu erstellten Modelle verloren und muss jedes Mal erneut nachgewiesen werden.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, die unterschiedlichen Materialflussmodelle in einem Materialflussmodell zu koppeln. Die Entwicklung der Materialflussteuerung kann dann mit einem einzigen Simulationsmodell und gezielten Simulationsläufen unterstützt werden. Dadurch reduziert sich der Modellerstellungsaufwand erheblich. Außerdem können doppelte Schritte bei der Modellerstellung vermieden werden und die Modellvalidität für bereits erstellte Modelle bleibt erhalten.

Daraus ergeben sich 4 Hypothesen, die in dieser Arbeit bestätigt werden sollen:

- Die gängigen Materialflussmodelle zur Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen können in einem gekoppelten Materialflussmodell zusammengefasst werden.

- Das gekoppelte Materialflussmodell kann durchgängig über alle Entwicklungsphasen eingesetzt werden. Durch die Kopplung gehen keine simulationstechnischen Anforderungen zur Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen in der jeweiligen Entwicklungsphase verloren.
- Mit dem gekoppelten Materialflussmodell kann der Modellierungsaufwand gegenüber entwicklungsphasenspezifischen Materialflussmodellen in den Entwicklungsphasen reduziert werden, d. h. es ergibt sich ein Zeitersparnis über den gesamten Entwicklungsprozess.
- Die Aussagekraft des gekoppelten Materialflussmodells ist mindestens genauso hoch wie die der bisherigen, individuellen und entwicklungsphasenspezifischen Materialflussmodelle.

Zunächst werden deshalb die mathematischen Modellbasen für den Transport und die Lagerung von Stückgütern mit den gängigen Materialflussmodellen analysiert. Dies beinhaltet eine detaillierte Betrachtung der mathematischen Kollisionsauflösung zwischen den Stückgütern und der Materialflusstechnik. Die notwendigen Kontaktinformationen für die Kollisionsauflösung, die aus der Kollisionserkennung des computerrechenbaren Materialflussmodells resultieren, werden als bekannt und richtig vorausgesetzt.

Anhand der Untersuchungen wird eine gekoppelte Modellbasis hergeleitet. Für verschiedene Fördertechnik-, Lagertechnik- und Handhabungssysteme wird überprüft, ob mit dieser Modellbasis weiterhin die Modellvalidität gegeben ist. Mittels geeigneter Vorgehensweise werden die simulationstechnischen Eigenschaften des gekoppelten Materialflussmodells validiert und verifiziert.

Die Kollisionserkennung, also die Berechnung der Kontaktinformationen, wird gesondert behandelt. Anhand der heute bekannten Verfahren für die Kollisionserkennung werden die Berechnungseigenschaften unterschiedlicher Implementierungen anhand repräsentativer Simulationsläufe verglichen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird dann eine Kollisionserkennung abgeleitet und realisiert, die den simulationstechnischen Anforderungen an das gekoppelte Materialflussmodell gerecht wird.

Die gewonnenen Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass ein gekoppeltes Materialflussmodell mit geeigneten Berechnungseigenschaften entworfen wurde. Für die Erstellung des Materialflussmodells wird nun ein blockschaltbildbasiertes Konzept entwickelt. Zu jedem Zeitpunkt können einzelne Bereiche im blockschaltbildbasierten Modelleditor geändert werden, ohne dass die Modelvalidität des verbleibenden Modells verloren geht. Weiterhin ist es möglich über einen globalen Parameter die simulationstechnischen Eigenschaften des Simulationslaufs festzulegen. Daraus ergibt sich insgesamt eine deutliche Zeitersparnis während der Modellierung.

Zuletzt wird das gekoppelte Materialflussmodell an einem Modellhochregallager evaluiert und die Gültigkeit der Aussagekraft des Simulationslaufs diskutiert. Die Wirkung des gekoppelten Materialflussmodells ist eine deutliche Reduzierung des Modellerstellungsaufwands bei bleibender Modellvalidität über alle Entwicklungsphasen.

Abstract

Internal material flow systems immediately influence a company's economic efficiency and contestability. At the same time, the requirements of a material flow control have reached a high level of complexity. The probability of occurrence as well as the severity of failure in control engineering through software errors represents a dominant problem within the internal material flow.

Therefore, new individual, problem specific material flow simulations are designed to ensure the development of the internal material flow system. The costs incurred from the additional time spent on the creation of the simulation, and those for the simulation software amortize already after the first use.

However, the creation of individual and problem specific simulations during the development phases is still very time consuming. For each modelling process specifically trained experts are needed. Furthermore, the particular results of the simulation cannot be used directly as an aid to develop material flow controls. In the development phase, the model validity – i.e. the accuracy of the simulation for its purpose of application – is lost after each simulation run because of the newly created models and has to be verified every time.

The aim of the thesis therefore is to couple the different material flow models into one. Thus, the development of a material flow control can be supported with one single simulation model and selective simulation runs. Thereby the efforts for the creation of new models reduces tremendously. Additionally, doublings in the course of the model creation can be avoided and the model validity for already created models is preserved.

As a consequence, there are four hypotheses which should be approved in this thesis:

- The standard material flow models to support the development of material flow controls can be coupled in one material flow model.
- The coupled material flow model can be used continuously employed during all development phases. The coupling ensures for every development phase that there is no loss in simulation technological requirements that have to be met to support the development of material flow controls.

- During development phases, the coupled material flow model reduces the effort for modelling compared to development-phase-specific material flow models, i.e. it enables time saving throughout the whole development process.
- The validity of the coupled material flow model is at least as high as the established/standard, individual, and development-phase-specific material flow models.

Initially, the mathematical model bases for transport and storage of cargo with the standard material flow models will therefore be analyzed. This includes a detailed consideration of the mathematical collision response between cargo as well as the material flow technology. The required contact information for the collision response resulting from the collision detection is assumed as known and correct.

Based on the consideration a coupled model base is deduced. It will be examined whether with this model base the model validity is preserved for different systems in materials-handling technology, storage technology, and handling. With an adequate approach the simulation technological features of the coupled material flow model are validated and verified.

The collision detection, i.e. the computation of contact information, will be treated separately. Referring to the methods of collision detection known today, the computational features of different implementations are compared with representative simulation runs. From the results a collision detection is deduced and realized which satisfies the simulation technological requirements the coupled material flow model has to meet.

The results obtained suggest that a coupled material flow model with appropriate computational features has been designed. To create a material flow model, a block diagram based concept will be developed. At any point particular areas can be changed in the block diagram based model editor without losing the model validity of the remaining model. Furthermore, it is possible to determine the simulation technological features via a global parameter. This leads to a significant time saving during the modelling process.

Finally, the coupled material flow model is evaluated with a model high-bay storage and the validity of the simulation run is discussed. The effect of the coupled material flow model is a

tremendous reduction of effort for the modelling process while maintaining the model validity over all development phases.

Kapitel 1

Einführung

1.1 Motivation und Problemstellung

Innerbetriebliche Materialflusssysteme sind heute in nahezu allen industriellen Fertigungseinrichtungen zu finden. Der innerbetriebliche Materialfluss beschreibt die räumliche, zeitliche und organisatorische „*Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche*“ (DIN 30781). Innerbetriebliche Materialflusssysteme sind also für die Transportvorgänge, den Transportablauf und die (Zwischen-)Lagerung aller Materialien in einer Fertigungseinrichtung zuständig. Durch Vernetzen von Bearbeitungsmaschinen und (Puffer-)Lager mit geeigneten Transportvorrichtungen und Handhabungssystemen entsteht das innerbetriebliche Materialflusssystem. (Arnold et al. 2009)

Der Transport und die Lagerung innerhalb einer Fertigungseinrichtung verursachen „*einen erheblichen Anteil an den Materialfluß- und Logistikkosten und damit an den Selbstkosten eines Produktes*“ (Fischer et al. 2003). Aggteleky schätzt die Materialflusskosten auf rund 20-40% der Selbstkosten eines Produktes. (Aggteleky 1990) Innerbetriebliche Materialflusssysteme beeinflussen damit unmittelbar die „*Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens*“ (Fischer et al. 2003).

Die Anforderungen an die Materialflussteuerung haben heute ein hohes Ausmaß an Komplexität erreicht. In Abbildung 1 wird deutlich, dass Ausfälle der Steuerungstechnik durch Softwarefehler schon heute ein dominierendes Problem bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes im innerbetrieblichen Materialfluss darstellen.

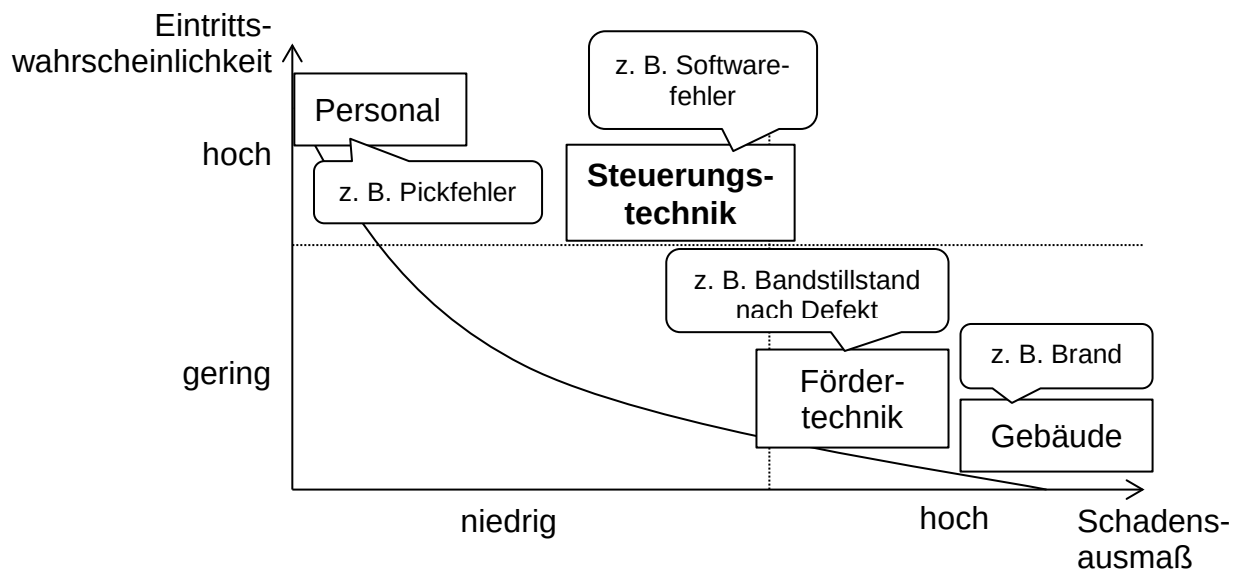


Abbildung 1: Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß durch Fehler in der Materialflussteuerung im Vergleich zu Personal, Fördertechnik und Gebäude (nach (Arnold 2006))

1.2 Zielsetzung

Eine effiziente Steuerungstechnik beeinflusst also die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens unmittelbar. Auf Basis geeigneter Entwicklungsphasen und Simulationen wird deshalb die Entwicklung und Validierung der Steuerungssysteme schon heute formalisiert und zeitnah durch Materialflusssimulationen abgesichert. Der Aufgabenbereich der Simulationen reicht dabei von logischen Materialflusssimulationen (Bathelt et al. 2003), ereignisbasierten Materialflusssimulationen (Bacs 2007), kinematischen Materialflusssimulationen (Wischnewski et al. 2004), kinetischen Materialflusssimulationen (Reinhart et al. 2009) bis hin zu flussbasierten Materialflusssimulationen (Hoher et al. 2011a).

Je nach Entwicklungsphase und Zielsetzung der Materialflusssimulation eignen sich diese in begrenztem Maße, um die Materialflussteuerungsentwicklung zu unterstützen. Deshalb werden je nach Entwicklungsphase und Zielsetzung neue problemspezifische Materialflusssimulationen entworfen. Die Kosten durch den zusätzlichen Zeitaufwand für die Erstellung der Simulation und die Simulationssoftware amortisieren sich schon nach dem einmaligen Einsatz. (Chance et al. 1996)

Dennoch ist die Erstellung der individuellen und problemspezifischen Simulationen in den Entwicklungsphasen immer noch sehr zeitaufwändig. Für jede Modellerstellung wird speziell ausgebildetes Fachpersonal benötigt. Ferner können die jeweiligen Simulationsergebnisse nicht direkt für die Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen verwendet werden. Die Modellvalidität – also die Richtigkeit der Simulation für den Einsatzzweck – geht zwischen den jeweiligen Simulationsläufen in den Entwicklungsphasen wegen der neu erstellten Modelle verloren und muss deshalb immer wieder erneut nachgewiesen werden.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, die unterschiedlichen Materialflussmodelle in einem gemeinsamen Materialflussmodell zu koppeln. Dadurch reduziert sich der Modellerstellungsaufwand erheblich. Doppelte Schritte bei der Modellerstellung können vermieden werden, da das gekoppelte bedarfsgerecht angepasst werden kann. Außerdem bleibt bei einer Modelländerung die Modellvalidität des bestehenden Modells erhalten.

Kapitel 2

Grundlagen zu Materialflusssystemen

2.1 Innerbetrieblicher Materialfluss

In dieser Arbeit wird der innerbetriebliche Materialfluss in der Produktion betrachtet. Dieser bezieht sich auf diskrete Materialien; sogenannte Stückgüter. *„Auch kontinuierliche Massen- und Volumenströme von Schüttgütern, Flüssigkeiten und Gasen lassen sich mittels geeigneter Behälter diskretisieren und können auf diese Weise wie Stückgut behandelt werden.“* (Arnold et al. 2009) Das Material kann sich dabei in regelmäßigen oder unregelmäßigen Zeitabständen bewegen. Es kann vorkommen, dass Material in einem Wareneingangs- oder Warenausgangslager deponiert wird und sich über einen längeren Zeitraum gar nicht mehr bewegt. Materialfluss darf also nicht als ein konstant fließender Prozess interpretiert werden, sondern muss als Prozess mit stockendem Fluss wahrgenommen werden. (Arnold et al. 2009)

Für eine Analyse des dynamischen Bewegungsverhaltens von Stückgütern im innerbetrieblichen Materialfluss ist der Geschwindigkeit-Zeit-Verlauf des Stückguts von Bedeutung. (Arnold et al. 2009)

2.2 Materialflusselemente: Fördertechnik, Handhabung und Lagertechnik

Der innerbetriebliche Materialfluss wird in die Materialflusselemente Fördertechnik, Handhabung und Lagertechnik unterteilt. (VDI 2860) Zusätzlich wird die Fördertechnik in die Kategorien Unstetigförderer und Stetigförderer unterteilt. (VDI 2510)

Fördertechnik

Stetigförderer, wie beispielsweise Rollenbahnförderer, Bandförderer, Kettenförderer, spurgeführte Transportsysteme und Hängebahnen zeichnen sich durch eine kontinuierliche Transportgeschwindigkeit aus. (VDI 4440-1) Spurgeführte Fördertechniken besitzen eine definierte Spur, die das Stückgut nicht verlassen kann. Obwohl Bandförderer durch das

Band eine Spur besitzen, wird Material über die gesamte Breite des Bandes transportiert. Hier spricht man von bandgeführter Fördertechnik. Wenngleich Material kontinuierlich transportiert wird, kann sich dieses beispielsweise durch Sperren auf der Fördertechnik aufstauen.

Unstetigförderer sind Transportmittel, die Stückgut mit einer diskontinuierlichen Transportgeschwindigkeit bewegen. (Martin 2014) Zu der Gruppe der Unstetigförderer zählen fahrerlose Transportsysteme, Flurförderzeuge, Krane und schienengebundene Fahrzeuge. Meist wird die Fördertechnik von der Materialflusssteuerung computergesteuert. An Kurven, Verzweigungen oder Zusammenführungen wird die Geschwindigkeit gedrosselt oder die Fördertechniken ganz angehalten. (VDI 2510)

Für den Transportvorgang nutzt man bei Fördertechnik mit Aktorsystemen häufig das physikalische Prinzip der Reibung zwischen den bewegten Elementen der Fördertechnik und dem Stückgut. Alternativ kann durch Formschluss und Zwangsbedingungen die Bewegungsfreiheit eingeschränkt und der Transportweg und die Transportgeschwindigkeit vorgegeben werden. Bei Fördertechnik ohne Aktorsystemen erfolgt der Transport mit Hilfe von Kraftfeldern; meist der Gravitation. (Römisch 2012)

Handhabung

Unter Handhabung „*ist das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhaltung einer vorgegebenen Anordnung von geometrisch bestimmten Körper[n]*“ (VDI 2860) zu verstehen. Die Handhabung wird dabei zum Verzweigen und Zusammenführen von Materialflüssen genutzt und zum Bedienen von Bearbeitungs- und Montageprozessen.

Durch Sperren kann Stückgut auf Stetig- und Unstetigförderern an vorbestimmten Stellen angehalten werden. Abweiser, Schieber, Hub-, Senk-, Schwenk- und Drehelemente, Schrägstellen der Fördertechnik, Klemmvorrichtungen wie Umwerfer und Greifgeräte oder Roboter dienen zum Ein- und Ausschleusen von Stückgütern. (Martin 2014)

Die Bewegungserzeugung bei Handhabungssystemen beruht wie bereits bei der Fördertechnik auf Reibung, Formschluss, Zwangsbedingungen, Kraftfeldern und Aktorsystemen.

Bei Handhabungssystemen wird dabei zusätzlich die Orientierung des Förderguts vorgegeben. (VDI 2860) Je nach Handhabungstechnik wird die Geschwindigkeit des Stückguts dabei gedrosselt oder kurzzeitig angehalten.

Lagertechnik

Die Lagertechnik dient zum Speichern von Material oder als Materialpuffer vor Arbeitsbereichen. Die Stückgüter werden je nach Lagerausführung direkt aufeinandergestapelt (Bodenlagerung), hintereinander gestapelt oder durch Lagerzeilen (Regallagerung) getrennt voneinander gelagert. (Römisch 2012)

Bei Hochregallagern ist der Einlagerungsvorgang durch die Regelbediengeräte zu berücksichtigen, die die Umschlagsleistung und damit den Grenzdurchsatz beschränken.

2.3 Materialflussteuerung

In innerbetrieblichen Materialflusssystemen haben sich komplexe Steuerungshierarchien mit klar definierten Kommunikationsstrukturen und Zielsetzungen etabliert. (Arnold et al. 2009) Nach der VDMA-Richtlinie 15276 und (Rücker 2006) können die folgenden Steuerungsebenen und -aufgaben identifiziert werden:

- Produktionssteuerung

Die Produktionssteuerung befasst sich mit strategischen, taktischen und operativen Steuerungsaufgaben. Darunter fallen insbesondere die Produktionsprogrammplanung, Mengenplanung, Termin- und Kapazitätsplanung, Auftragsveranlassung, -freigabe und -überwachung. (Rücker 2006)

- Systemsteuerung

In der Systemsteuerung „*werden alle Transportvorgänge zentral gesteuert*“ (Wilke 2006). Außerdem sind Transportstrategien implementiert, um optimierte Aufträge für die Subsystemsteuerungen zu generieren. (Wilke 2006) Die Systemsteuerung ist Teil des Materialflussrechners und kommuniziert in Echtzeit beziehungsweise nahezu in Echtzeit mit den darunterliegenden Steuerungen. (Arnold et al. 2009)

- Subsystemsteuerung

Subsysteme bilden ein abgeschlossenes Teilsystem aus Materialflusselementen; zum Beispiel ein Hochregallager mit den dazugehörigen Regalbediengeräten oder die Fördertechnik des Wareneingangs. (Jodin et al. 2006) *„Die Subsystemsteuerung ermöglicht zumindest den teilautomatisierten Betrieb eines Subsystems.“* (Jodin et al. 2006) Die Subsystemsteuerung ist *„üblicherweise durch Industrie-PC oder speicherprogrammierbare Steuerungen realisiert.“* (Wilke 2006) Die Kommunikation zu Bereichs- und Elementsteuerungen, Messsystemen und Aktorsystemen erfolgt in Echtzeit.

- Bereichssteuerung

Bereichssteuerungen bilden eine funktionale Einheit von Elementsteuerungen.

- Elementsteuerung (Maschinensteuerung)

Elementsteuerungen – beziehungsweise Maschinensteuerungen – haben die Aufgabe, Informationen mit Hilfe von Aktorsystemen so umzusetzen, dass die *„erforderlichen Maschinenaktionen und physische Abläufe entstehen“* (Arnold et al. 2009). Dazu erhält die Elementsteuerung auch einen Informationsrückfluss aus geeigneten Messsystemen. Funktionale Sicherheitsfunktionen sind ebenfalls hier implementiert. (Jodin et al. 2006) Maschinensteuerungen sind üblicherweise als speicherprogrammierbare Steuerungen realisiert.

Der Verbund aus Systemsteuerung, Subsystemsteuerung, Bereichssteuerung und Elementsteuerung wird auch als Materialflussteuerung bezeichnet. *„Die Materialflussteuerung koordiniert, unter Synchronisation von Materialfluss und Informationsfluss, die Bereitstellung der an der Produktion beteiligten Materialien und Waren zur rechten Zeit am richtigen Ort in gewünschter Menge und Qualität.“* (Wilke 2006)

Bis auf die Produktionssteuerung werden die jeweiligen Steuerungsfunktionen in einem fest vorgegeben Takt, dem sogenannten Steuerungstakt, zyklisch ausgeführt. Zu Beginn des Steuerungstaktes wird ein Prozessabbild der Eingangssignale – also der angeschlossenen Peripherie – gelesen. Die Steuerungsfunktionen berechnen daraufhin die Stellsignale. Am Ende des Steuerungstaktes werden die Stellsignale in das Prozessabbild der Ausgänge geschrieben und so an die Peripherie kommuniziert. Der Steuerungstakt liegt bei modernen

Elementsteuerungen im Bereich von 1 bis 100 Millisekunden und wird bis zur Subsystemsteuerung – oft auch bis zur Systemsteuerung – aufrechterhalten. Die Produktionssteuerung hat in der Regel keinen festen Steuerungstakt, sondern kommuniziert bedarfsgerecht mit den unterlagerten Systemen.

Abbildung 2 zeigt das Beispiel einer Hardwarekonfiguration einer modernen Materialflusssteuerung. Die gesamte Materialflussteuerung erfolgt dabei über verteilte Steuerungssysteme. Dafür wird eine vertikale Kommunikation zwischen Elementsteuerung, Bereichssteuerung, Subsystemsteuerung und Systemsteuerung hergestellt. Die vertikale Kommunikation erfolgt in Realzeit¹, derzeit auf Basis realzeitfähiger Feldbussysteme, wie EtherCAT, Sercos oder ProfiBus. Die Kommunikation zwischen Materialflussteuerung und Produktionssteuerung erfolgt meistens in Nicht-Echtzeit über ein sogenanntes firmeninternes Wide-Area-Netzwerk. (Arnold et al. 2009)

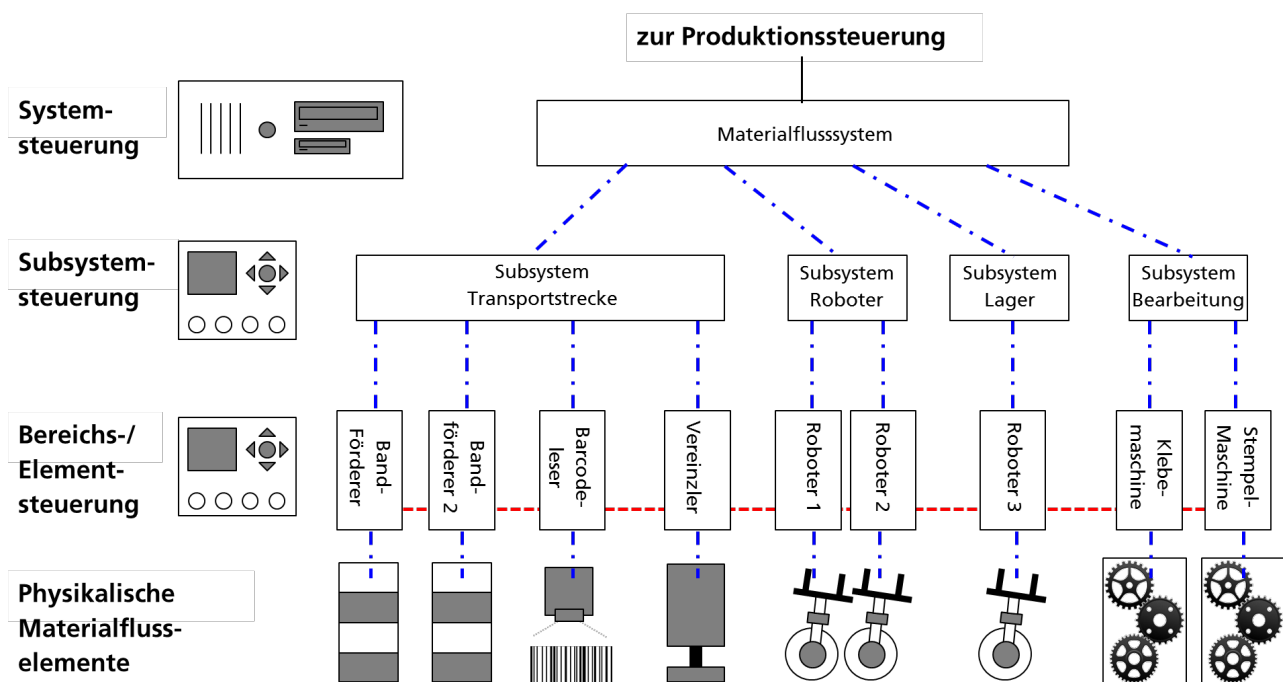


Abbildung 2: Beispiel der Hardwarekonfiguration einer Materialflussteuerung nach VDMA-Richtlinie 15276. Die horizontale Kommunikation zwischen den Bereichs-/Elementsteuerungen wurde entsprechend dem in dieser Arbeit aufgezeigten Stand der Technik ergänzt.

¹ Die genaue Definition des Begriffs ‚Realzeit‘ und eine Abgrenzung zum Begriff ‚Echtzeit‘ erfolgt in Kapitel 3.2.

Auf der Ebene der Elementsteuerungen und Bereichssteuerungen findet auch eine intensive horizontale Kommunikation zwischen den Systemen statt (vgl. Abbildung 2). Die Steuerungssysteme sind auf die Informationen benachbarter Materialflusselemente angewiesen, um ihre Steuerungsfunktionen zu erfüllen.

Der nachträgliche Ausbau der horizontalen Kommunikation bedeutet einen erheblichen nachträglichen Projektierungs- und Modernisierungsaufwand für die Steuerungssysteme und Kommunikationsstrukturen. Durch Identifikationssysteme wurde ein einfacher Weg gefunden, die horizontale Kommunikation zu realisieren, ohne diese Kosten in die Infrastruktur der Kommunikationssysteme zu investieren. (Arnold et al. 2009)

2.4 Messsysteme

Messsysteme dienen dem Erkennen und Identifizieren von Stückgütern während des Transports im innerbetrieblichen Materialflusssystem und sind für die Materialflussteuerung unerlässlich. Dabei können Merkmale des Stückguts oder auf am Stückgut angebrachte Identifikationsträger mit einem geeigneten Lesegerät abgefragt werden. Teilweise verfügen Identifikationsträger auch über einen mobilen Datenspeicher. Dieser Datenspeicher kann bei den Abfragen mit einem Schreibgerät auch angepasst oder neu beschrieben werden. Dadurch kann eine vollautomatische Materialflussteuerung realisiert werden. (VDI 2515), (Krämer 2002)

2.5 Aktorsysteme

Aktoren haben die Aufgabe den Materialfluss zielgerichtet zu beeinflussen. Sie sind die bewegungsbeeinflussende Schnittstelle zwischen Steuerungssystem und physikalischem Materialflusssystem. (Jünemann et al. 1998)

Oft können die Stellsignale der Steuerungssysteme als einfache Schalter realisiert werden, die Hilfsenergie ein- oder ausschalten. Bei elektrischen Stellgliedern (z. B. Schrittmotor) übernimmt die Aufgabe der Stellsignalverarbeitung und des Stellantriebs ein Antriebsverstärker. Durch die Rückmeldung des Stellantriebs und der Stellsignalverarbeitung wird ein geregeltes Bewegungsprofil zwischen Steuerungssystem und Materialflusssystem geschaf-

fen. Bei hydraulischen und pneumatischen Stellgliedern erfolgt normalerweise keine Rückmeldung des Stellantriebs. Diese Stellantriebe werden deshalb gerne für diskrete Bewegungsaufgaben eingesetzt. (Jünemann et al. 1998)

Das durch das Aktorsystem erzeugte Bewegungsprofil ist also a priori bekannt, falls die Hilfsenergie im vorgesehenen Maß zur Verfügung steht. Nur in Fehlersituationen, beispielsweise dem Verklemmen von Stückgut, kommt es zu einem unbekannten Bewegungsprofil, wenn die Kraft der Hilfsenergie nicht ausreichend ist.

Kapitel 3

Stand der Technik

3.1 Nutzungsmöglichkeiten von Materialflusssimulation

„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ (VDI 3633-1) Dafür werden heute insbesondere computerrechenbare Simulationsmodelle für PC-Systeme eingesetzt. (Kaiser 1999) Die Ausführung eines computerrechenbaren Simulationsmodells wird im Folgenden als Simulationslauf oder kurz als Simulation bezeichnet, die Phase zwischen zwei Simulationsergebnissen als Simulationsschritt.

In der VDI-Richtlinie 3633 (VDI 3633-1) werden die Nutzungsmöglichkeiten der Simulation von innerbetrieblichen Materialflusssystemen unterschieden. Daraus können verschiedene Nutzungsmöglichkeiten der Materialflusssimulationen abgeleitet werden:

1. Die Anforderungen an die Funktionen werden identifiziert.
2. Die Funktionen ohne Hardware werden vorab getestet.
3. Die Funktionen ohne Hardware werden vorab verifiziert.
4. Die Funktionen inklusive der Hardware werden vorab verifiziert.
5. Die Funktionen inklusive der Hardware werden vorab validiert.

Beim Testen werden auf systematische Art und Weise Fehler aufgedeckt; Beim Verifizieren wird überprüft, ob sich ein System gemäß den Vorgaben verhält und beim Validieren wird überprüft, ob ein System die gewünschten Anforderungen mangelfrei erfüllt. (Boehm 1984), (Cleff 2010)

Zum Erreichen dieser Zielsetzung werden die Steuerungsfunktionen mit bzw. ohne Hardware an die Materialflusssimulation angebunden. Dafür wurden verschiedene Simulationsplattformen entwickelt (Danielsson et al. 2003):

- a. Simulation der Funktionen ohne Hardware gegen die Materialflusssimulation.
- b. Emulation der Funktionen ohne Hardware gegen die Materialflusssimulation.
- c. Simulation der Funktionen und der Hardware gegen die Materialflusssimulation.
- d. Emulation der Funktionen und der Hardware gegen die Materialflusssimulation.
- e. Reale Hardware mit Funktionen gegen die Nicht-Echtzeit-Materialflusssimulation mit virtueller Zeitleiste.
- f. Reale Hardware mit Funktionen gegen die Echtzeit-Materialflusssimulation.
- g. Reale Hardware mit Funktionen an der Realzeit-Materialflusssimulation.

Je nach Simulationsplattform können allerdings nur einige Nutzungsmöglichkeiten der Materialflusssimulation erschlossen werden, da Programmiersprache, Verhaltenseigenschaften und Funktionalität unberücksichtigt bleiben, Code-Modifikationen notwendig sind oder die Reproduzierbarkeit eines Simulationslaufs nicht gegeben ist.

In Tabelle 1 sind die möglichen Nutzungsmöglichkeiten (1) bis (5) über den Simulationsplattformen (a) bis (g) aufgetragen. Exemplarisch wird jeweils ein grundlegendes Problem mit dem Verbindungstyp genannt.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Nutzungsmöglichkeiten der Materialflusssimulation

Simulationsplattform	1. Identifikation von Funktionen	2. Test der Funktionen ohne Hardware	3. Verifikation der Funktion ohne Hardware	4. Verifikation der Funktionen inkl. Hardware	5. Validierung der Funktionen inkl. Hardware	Probleme
a: Simulation der Funktionen	x	x				Änderung der Programmiersprache und Implementierung für die entsprechende Zielhardware
b: Emulation der Funktionen	x	x				Verhaltenseigenschaften der Zielhardware bleiben unberücksichtigt
c: Simulation der Funktionen und der Hardware	x	x	x			Funktionalitäten der Zielhardware bleiben unberücksichtigt
d: Emulation der Funktionen und der Hardware	x	x	x			Emulator der Zielhardware evtl. nicht verfügbar
e: Reale Hardware mit Funktionen (virtuelle Zeitleiste)	x	x	x	x		Modifikation der Implementierung an die virtuelle Zeitleiste
f: Reale Hardware mit Funktionen (Echtzeit-Simulation)	x	x	x	x		Simulationsläufe sind nicht reproduzierbar aufgrund von abweichendem Zeitverhalten
g: Reale Hardware mit Funktionen (Realzeit-Simulation)	x	x	x	x	x	Simulationslauf muss in Realzeit ausgeführt werden

Nur mit einer Realzeit-Materialflusssimulation ist es möglich alle Nutzungsmöglichkeiten zu erschließen. Die Test-, Verifizierungs- und Validierungsergebnisse besitzen jedoch nur soweit eine Aussagekraft, wie die Genauigkeit der Materialflusssimulation. Auch bei einem bereits durch Materialflusssimulation getesteten und validierten Steuerungssystem ist deshalb beim Einsatz der realen Steuerungssysteme am realen Materialflusssystem immer noch ein Fehlverhalten möglich. (Danielsson et al. 2003) Wird jedoch ein geeignetes Materialflussmodell gewählt, kann nach (Reinhart et al. 2007) die Softwarequalität der Steuerungsfunktionen um bis zu 100% gesteigert werden und der Entwicklungsprozess der Steuerungssysteme, trotz zusätzlichen Aufwands für die Modellbildung, um 15% verkürzt werden.

3.2 Anforderungen an die Materialflusssimulation

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen Nutzungsmöglichkeiten der Materialflusssimulation ermöglichen ein breites Spektrum zum Identifizieren, Testen, Validieren und Verifizieren von Steuerungsfunktionen und Steuerungssystemen. Je nach beschriebener Nutzungsmöglichkeit, müssen die Simulationsplattformen bestimmte Struktureigenschaften, sogenannte systemtechnische Anforderungen, erfüllen. Außerdem werden simulationstechnische Anforderungen an die Berechnungseigenschaften der computerrechenbaren Materialflusssimulationen gestellt. (Pritschow et al. 2005), (Kaiser 1999) Die Anbindung an die Steuerungssysteme erfordert weiterhin definierte Datenformate bei der Dateneingabe und -ausgabe, die datentechnischen Anforderungen. In den nachfolgenden Kapiteln werden die simulationstechnischen, datentechnischen und systemtechnischen Anforderungen erläutert.

3.2.1 Simulationstechnische Anforderungen

Je nach Simulationsplattform und Nutzungsmöglichkeit werden unterschiedliche **simulationstechnische Anforderungen** an die Materialflusssimulationen gestellt:

- Ausreichende Genauigkeit,
- Robustheit,
- Durchschnittlicher Zeitdeterminismus,
- Realzeitdeterminismus.

3.2.1.1 Ausreichende Genauigkeit

Für Simulationen gilt immer der Leitsatz: „[S]o grob wie möglich und nur so genau wie nötig [...]“. (Schlecht et al. 2001) Demzufolge sollte idealerweise nur das für die Untersuchungen benötigte Verhalten simuliert werden. Dadurch werden unnötige und irreführende Details in den späteren Simulationsläufen vermieden und die Berechnung des Simulationslaufs beschleunigt. Die Materialflusssimulation sollte folglich eine „*ausreichende Genauigkeit*“ (und nicht mehr) besitzen. (Pritschow et al. 2005)

3.2.1.2 Robustheit

Bei der Robustheit wird gefordert, dass in beliebigen Systemzuständen und Systemkonfigurationen zu jedem Zeitpunkt während eines Simulationslaufes ein gültiges (nicht zwingend richtiges) Simulationsergebnis berechnet wird. Insbesondere verfängt sich der Simulationslauf zu keinem Zeitpunkt in Endlosschleifen, beendet sich oder gibt ungültige Simulationsergebnisse aus. Einige Laufzeitsysteme beenden sich auch nach der Übermittlung ungültiger Werte oder bei Operationen mit ungültigen Werten.

3.2.1.3 Durchschnittlicher Zeitdeterminismus

Für den durchschnittlichen Zeitdeterminismus gilt zwingend das folgende Kriterium (Stoeppler et al. 2005): Die Berechnungsdauer der Simulationsschritte während eines Simulationslaufs muss im Durchschnitt kleiner sein als die Zykluszeit der Steuerungstechnik.

Der durchschnittliche Determinismus findet bei der Echtzeitsimulation Anwendung. Insbesondere durch den Scheduler und die Interrupts eines Betriebssystems und durch dynamische Speicherallokationen während eines Simulationslaufs kann es zu willkürlichen Rechenzeiterhöhungen im Zuge eines Simulationsschrittes kommen. Dann ist die Reproduzierbarkeit der Simulationsläufe beim Testen und Validieren der Steuerungssysteme nicht gewährleistet. (Röck 2007) Falls ein Steuerungssystem in einem definierten Zeitintervall eine Antwort von der Simulation erwarten (beispielsweise bei der Regelung der Achspositionen), können dadurch im Steuerungssystem Fehlerzustände herbeigeführt werden, die real nicht auftreten würden. (Stoeppler et al. 2005)

3.2.1.4 Realzeitdeterminismus

Beim Realzeitdeterminismus wird gewährleistet, dass zu Beginn des Steuerungstaktes mit der „*Wahrscheinlichkeit gleich 1*“ (Krämer 2002) ein Simulationsergebnis bereitgestellt wird. Die Realzeitsimulation mit Realzeitdeterminismus ermöglicht reproduzierbare Simulationsläufe, da der Simulationslauf immer das gleiche Zeitverhalten aufweist. Dafür muss das computerrechenbare Simulationsmodell die realzeitdeterministischen Berechnungseigenschaften erfüllen (Pritschow et al. 2004), (Röck 2007), (Pritschow et al. 2005):

- Realzeit-Speichermanagement

Werden dynamische Speicheranforderungen während eines Simulationslaufs vom Betriebssystem verwaltet, so sind diese nicht zeitdeterministisch. Je nach Belegung des Arbeitsspeichers kann eine dynamische Speicheranforderung wenige Mikrosekunden bis einige Millisekunden dauern. Ein Realzeit-Speichermanagement stellt sicher, dass während eines Simulationslaufs kein Arbeitsspeicher dynamisch allokiert wird. Oft verweist das Realzeit-Speichermanagement auf einen gekapselten Speicherbereich, der nur von der Realzeitanwendung genutzt wird. Dadurch wird ein deterministisches Lesen und Schreiben auf den Speicher gewährleistet. Der eingesetzte Arbeitsspeicher sollte deshalb effizient genutzt werden, da diese gekapselten Speicherbereiche in der Regel nur wenige 100 Megabyte groß sind.

- Zeitdeterminismus

Erfolgt die Abarbeitungsreihenfolge des Simulationsprogramms unkoordiniert, so kann die Berechnung der Simulationsschritte während eines Simulationslaufes unterschiedlich lange dauern. Beim Zeitdeterminismus, ist die maximale Berechnungsdauer jedes Simulationsschrittes bekannt. Berechnungsalgorithmen mit einer unbekannten Anzahl an Iterationen zur Lösungsfindung widersprechen beispielsweise dieser Forderung.

- Echtzeitbetriebssystem(-erweiterungen)

Durch Optimierungen im Standardbetriebssystem kann die Vorhersage der Berechnungsdauer eines Simulationsschrittes auch bei bekannten Berechnungsalgorithmen und bekannter Hardware eingeschränkt sein. (Kaiser 1999) Echtzeitbetriebssysteme, aber auch Echtzeiterweiterungen für Standardbetriebssysteme (Carpenter et al.

1997) ermöglichen es trotzdem, fundierte Aussagen über die Abweichung der Berechnungsdauer zu treffen. Abweichungen sind typischerweise bei einer zyklischen Ausführung von 1 Millisekunde unter 25 Mikrosekunden, im Durchschnitt sogar unter 1 Mikrosekunde. (Obenland et al. 1999) Nachteil dieser Lösungen ist, dass Anwendungsbibliotheken wie die Standard Template Library nicht unterstützt werden. (Stepanov et al. 1995)

Der Realzeitdeterminismus, wie er für ein Simulationsmodell benötigt wird, kann durch zwei Möglichkeiten nachgewiesen werden: (Kaiser 1999)

- Konstruktive Vorgehensweise

„Durch eine Auswahl von Methoden und Techniken können die Voraussetzung für harte Realzeit und den Nachweis zur Einhaltung von Zeitbedingungen geschaffen werden.“ (Kaiser 1999) Weil Simulationsmodelle oft auf bereits entwickelten Softwarebibliotheken aufbauen, die mehrere 10000 Zeilen Code umfassen können, ist die Konsequenz dieser Aussage, dass eine genaue Code-Inspektion notwendig ist. Im schlechtesten Fall müssen die eingesetzten Softwarebibliotheken sogar vollständig neu entwickelt werden.

- Experimentelle Vorgehensweise

Erfahrungswerte, Messungen und Abschätzungen und die Kenntnis über den Verwendungszweck erlauben auch durch Experimente den Zeitdeterminismus nachzuweisen. Voraussetzung ist, dass nicht der Fall eintritt, dass benötigten Parameter unbekannt sind, weil z. B. wegen Zufallsprozessen kein Determinismus gegeben ist. Dann sind die Zeitbedingungen nicht exakt ermittelbar. (Kaiser 1999)

3.2.1.5 Zusammenfassung

Wenn man die zuvor genannten simulationstechnischen Anforderungen auf die in die Kapitel 3.1 eingeführten Simulationsplattformen überträgt, so entsteht Tabelle 2. Für die Simulation bzw. Emulation der Steuerungsfunktionen und der Hardware (siehe Tabelle 1, a-d) werden lediglich eine ausreichende Genauigkeit und die Robustheit der Materialflusssimulation notwendig. Dies gilt auch, wenn die reale Hardware mit Steuerungsfunktionen über eine virtuelle Zeitleiste (siehe Tabelle 1, e) an die Materialflusssimulation angebunden wird.

Bei der realen Hardware mit Steuerungsfunktionen an der Echtzeit-Materialflusssimulation muss zusätzlich der durchschnittliche Zeitdeterminismus erfüllt sein, bei der Realzeit-Materialflusssimulation der Realzeitdeterminismus.

Tabelle 2: Simulationstechnische Anforderungen sortiert unter den Simulationsplattformen aus Kapitel 3.1 und Tabelle 1

Simulationstechnische Anforderungen	Simulationsplattformen aus Tabelle 1		
	Nicht-Echtzeit (a, b, c, d, e)	Echtzeit (f)	Realzeit (g)
Ausreichende Genauigkeit	x	x	x
Robustheit	x	x	x
Durchschnittlicher Zeitdeterminismus		x	x
Realzeitdeterminismus			x

3.2.2 Datentechnische Anforderungen

Neben den simulationstechnischen Anforderungen ergeben sich auch **datentechnische Anforderungen**. Hier wird gefordert, dass die Ein- und Ausgabedaten des Steuerungssystems mit dem realen technischen System äquivalent zu der Materialflusssimulation sind oder in einfacher Weise umgerechnet werden können.

3.2.3 Systemtechnische Anforderungen

Die **systemtechnischen Anforderungen** betreffen einerseits die kommunikationsspezifischen Schnittstellen und Synchronisierungsmöglichkeiten zwischen Steuerungssystemen und Simulation, andererseits die Art der Steuerungssimulation und -emulation. (Dierßen 2002) Die systemtechnischen Anforderungen an die Simulationsplattformen wurden bereits durch zahlreiche Simulationswerkzeuge erfolgreich erfüllt und verifiziert. (Röck 2007), (Dierßen 2002), (Wünsch 2007), (Wischnewski 2007).

3.3 Materialflussmodelle

In Materialflussmodellen werden die Transportvorgänge des Stückguts auf Fördertechnik, Lagertechnik und Handhabung abgebildet. Die Transportvorgänge werden im ersten Schritt in einem physikalischen Ersatzmodell idealisiert (vgl. Abbildung 3). Dafür werden Annahmen getroffen, um den Transportvorgang zu approximieren. Das physikalische Ersatzmodell ist also immer auf die zu beantwortende Fragestellung ausgerichtet. Aus dem physikalischen Ersatzmodell werden mathematische Gleichungen abgeleitet und in einem mathematischen Modell zusammengefasst. Durch eine Programmerstellung wird das mathematische Modell in ein computerrechenbares Simulationsmodell überführt. (Kübler et al. 2000a), (Kortüm et al. 1994) Im Folgenden wird ein computerrechenbares Simulationsmodell verkürzt als Simulationsmodell bezeichnet.

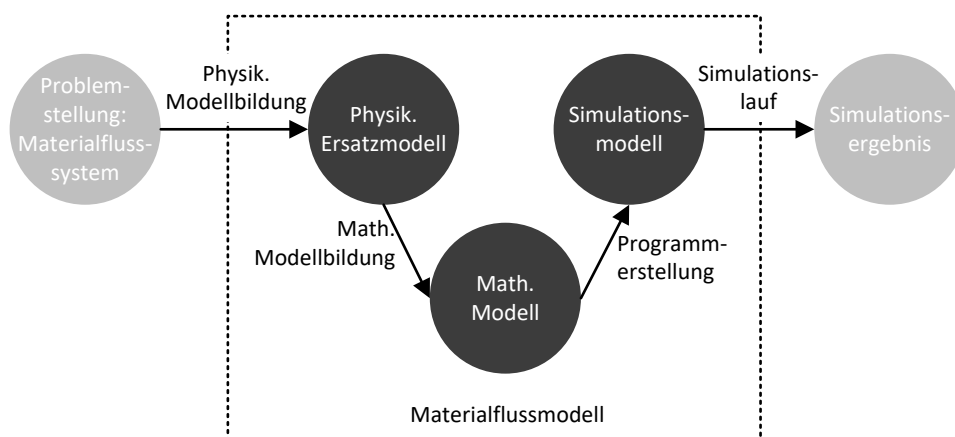


Abbildung 3: Ablaufschema für die Modellbildung und Simulation nach (Kortüm et al. 1994)

Je nach Zielsetzung unterscheiden sich die physikalischen Ersatzmodelle im Abstraktionsniveau und damit der Abbildungsgenauigkeit. Als „hohes Abstraktionsniveau“ wird lediglich der Materialfluss zwischen den Materialflusselementen betrachtet. Dieser wird mit diskreten, ereignisorientierten Materialflussmodellen (Kuo et al. 2002), Systemdynamik-Materialflussmodellen (Forrester 1977), Warteschlange-Materialflussmodellen (Hopp et al. 1991) oder flussbasierten Netzwerk-Materialflussmodellen (Hoher et al. 2011a), (Göttlich et al. 2014) beschrieben, wobei letztere aktuell noch Gegenstand von Forschungsarbeiten sind. Alle

diese Modelle eignen sich nur bedingt zur Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen, finden aber bei betriebswirtschaftlichen Betrachtungen starke Anwendung. (Arnold et al. 2009)

In einem detaillierten Abstraktionsniveau wird in dem Materialflussmodell die Bewegung der Stückgüter auf den Materialflusselementen und deren Interaktion mit Aktor- und Messsystemen beschrieben. Aufgrund der genauen Beschreibung der Materialbewegung eignen sich diese Modelle zur Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen nach Kapitel 3.1. Diese sehr detaillierte Materialflusssimulation wird heute mit den kinematischen Materialflussmodellen (Wischnewski et al. 2004) und den kinetischen Materialflussmodellen (Reinhart et al. 2009), (Göttlich et al. 2014), (Hoher et al. 2011a) realisiert.

3.3.1 Kinematische Materialflussmodelle

Kinematische Materialflussmodelle bilden die Stückgutbewegung auf Materialflusselementen anhand **kinematischer Geschwindigkeitsfelder** ab. Hierunter wird verstanden, dass jedem Punkt auf den Materialflusselementen ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet ist. Bei einem Stückgutkontakt wird dieser Geschwindigkeitsvektor auf das Stückgut übertragen.

3.3.1.1 Physikalisches Ersatzmodell

Im physikalischen Ersatzmodell wird der Transport der einzelnen Stückgüter im innerbetrieblichen Materialflusssystem abgebildet. Stückgüter werden entlang von vorgegebenen kinematischen Feldern im dreidimensionalen Raum bewegt. Die Orientierung der Stückgüter wird anhand des jeweiligen Materialflusselements ermittelt.

Dafür werden für die Fördertechnik und die Handhabung Geschwindigkeitsfelder approximiert. Bei einem Kontakt des Stückguts mit einem Geschwindigkeitsfeld wird dieses entlang des Geschwindigkeitsfeldes geführt. Lagertechnik kann als ein Geschwindigkeitsfeld mit der Geschwindigkeit 0 m/s betrachtet werden. Außerdem wird der Fall von sich aufstauendem Stückgut berücksichtigt. (Wischnewski 2007)

3.3.1.2 Mathematisches Modell

Die Bewegung eines Stückguts auf einem Materialflusselement kann im mathematischen Modell mittels der folgenden Transformation beschrieben werden:

$${}^{SG}\mathbf{x}(t+h) = {}^{SG}\mathbf{x}(t) + {}^{ME}\tilde{\mathbf{v}}({}^{SG}\mathbf{x}(t)) \cdot h \quad (3.1)$$

und

$${}^{SG}\mathbf{q}(t+h) = {}^{ME}\tilde{\mathbf{q}}({}^{SG}\mathbf{x}(t))$$

mit

$${}^{ME}\tilde{\mathbf{v}}/{}^{ME}\tilde{\mathbf{q}}({}^{SG}\mathbf{x}(t)) = \begin{cases} {}^{ME}\mathbf{v}/{}^{ME}\mathbf{q}({}^{SG}\mathbf{x}(t)) & \text{falls } {}^{SG}\mathbf{x}(t) \in {}^{ME}\mathcal{A}, \\ 0/{}^{SG}\mathbf{q} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dabei ist ${}^{SG}\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ die Position und ${}^{SG}\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ die Orientierung des Stückguts SG geschrieben als Quaternion zum Zeitpunkt t . h ist das Zeitintervall zwischen zwei Simulationsschritten, die sogenannte Simulationsschrittweite. ${}^{ME}\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ ist das Geschwindigkeitsfeld und ${}^{ME}\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ das Orientierungsfeld des Materialflusselements ME. Falls sich ein Stückgut nicht in dem Gültigkeitsbereich ${}^{ME}\mathcal{A}$ des Materialflusselements befindet, wird das Bewegungsverhalten des Stückguts folglich auch nicht beeinflusst. Jedes Stückgut wird in diesem mathematischen Modell immer exakt einem Materialflusselement zugeordnet. Die Gültigkeitsbereiche ${}^{ME}\mathcal{A}$ der Materialflusselemente dürfen sich folglich nicht überlappen.

Um das Verhalten von Antrieben und einfache physikalische Effekte berücksichtigen zu können wird das Stückgut anhand der Geschwindigkeitstrajektorie und nicht anhand einer Positionstrajektorie bewegt, wie es für die Rotationsbewegung der Fall ist. (Wischnewski 2007) Wischnewski (Wischnewski 2007) reduziert das Geschwindigkeitsfeld ${}^{ME}\mathbf{v}({}^{SG}\mathbf{x}(t))$ auf eine Geschwindigkeitstrajektorie

$${}^{ME}\mathbf{v} = {}^{ME}\mathbf{v}({}^{ME}p),$$

mit dem Parameter

$${}^{ME}p = {}^{ME}d/{}^{ME}s,$$

wobei ${}^{ME}d \in \mathbb{R}^+$ die zurückgelegte Strecke und ${}^{ME}s \in \mathbb{R}^+$ die Streckenlänge auf dem Materialflusselement ME ist. Stückgut kann sich dann nur entlang dieser Trajektorie bewegen. Dieser Ansatz eignet sich insbesondere zur Simulation von Stückgütern auf spurgeführter Fördertechnik.

In dem Simulationswerkzeug ISG-virtuos wird das Geschwindigkeitsfeld auf eine Geschwindigkeitsfeldkonstante zurückgeführt

$${}^{ME}\boldsymbol{v} = {}^{ME}\boldsymbol{v} \in \mathcal{O}(1).$$

Dieser Simulationsansatz eignet sich zur Simulation von Stückgut auf linearer bandgeführter Fördertechnik ohne Kurvensegmente.

3.3.1.3 Computerrechenbares Simulationsmodell

Das mathematische Modell aus Gleichung (3.1) kann direkt in ein computerrechenbares Simulationsmodell überführt werden. Dafür werden die zeitkontinuierlichen Größen direkt in eine zeitdiskrete Größe überführt, beispielsweise wird ${}^{SG}\boldsymbol{x}(t_k)$ zum Zeitpunkt t_k zu ${}^{SG}\boldsymbol{x}_k$ mit $k \in t_1, \dots, t_K$ und $t_k = t_{k-1} + h_k$.

Die Zuordnung der Gültigkeitsbereiche der Materialflusselemente zum Stückgut erfolgt im computerrechenbaren Modell über Knotenverbindungen zwischen Materialflusselementen und dem Ein- und Auslasten von Stückgut an definierten Knoten. Sobald während des Simulationslaufs ein Stückgut einen Knoten passiert, wird überprüft, ob eine definierte **Transitionsbedingung** erfüllt ist. Falls diese erfüllt ist, wird das Stückgut dem Gültigkeitsbereich des verbundenen Materialflusselements zugeordnet. Das Ein- und Auslasten von Stückgut erfolgt analog dazu. (Wischnewski 2007)

Zusätzlich wird ermittelt, ob sich Stückgut während eines Zeitschrittes überlappt. Über geeignete Algorithmen wird eventuell die Stückgutposition korrigiert. Um alle Überlappungen vollständig in einem Simulationsschritt auflösen zu können, werden iterative Algorithmen eingesetzt. Wischnewski (Wischnewski 2007) bestimmt dafür alle Zeitpunkte für das Auftreten aller Überlappungen und unterteilt den aktuellen Zeitschritt h in entsprechend viele Unterschritte, die dann nacheinander aufgelöst werden.

Der computerrechenbare Algorithmus kann also in eine Modellierungsphase, die aktiv vom Simulationswerkzeugbenutzer abhängt, und die Laufzeitphase, die unabhängig vom Benutzer ist, unterteilt werden. In der Modellierungsphase ist ein definiertes Vorgehen gefordert, damit das computerrechenbare Simulationsmodell korrekt gelöst werden kann:

1. Approximation der Materialflusselemente mittels Geschwindigkeitsfelder.
2. Verbinden der Geschwindigkeitsfelder an definierten Knoten.
3. Definition von Knoten zum Ein- und Auslasten von Stückgütern.

In Abbildung 4 ist der Programmablaufplan für einen Simulationsschritt dargestellt. Wenn alle dargestellten Operationen zeitdeterministisch gelöst werden können und die iterative Auflösung der Überlappung durch geeignete zeitdeterministische Algorithmen entfernt wird, kann das kinematische Materialflussmodell realzeitdeterministisch berechnet werden.

Das Simulationswerkzeug *Ciros*, das auf den Arbeiten von (Wischnewski 2007) und folglich auf dem Programmablaufplan aus Abbildung 4 basiert, setzt das kinematische Materialflussmodell aufgrund der beschriebenen Iterationen beim Auflösen der Überlappungen nur mit einem durchschnittlichen Zeitdeterminismus um. Es kann deshalb für Simulationsplattformen mit Echtzeit-Materialflusssimulationen genutzt werden (vgl. Kapitel 3.1 und Tabelle 1).

Das Simulationswerkzeug *ISG-virtuos* berechnet kinematische Materialflussmodelle mit mehreren hundert Stückgütern bei einer Simulationsschrittweite von 1 Millisekunde realzeitdeterministisch. Es kann deshalb sowohl für Simulationsplattformen mit Echtzeit- als auch Realzeit-Materialflusssimulationen genutzt werden (vgl. Kapitel 3.1 und Tabelle 1). Hierbei gilt dort die Einschränkung, dass nur lineare Bandförderer und keine Reibungseffekte abgebildet werden.

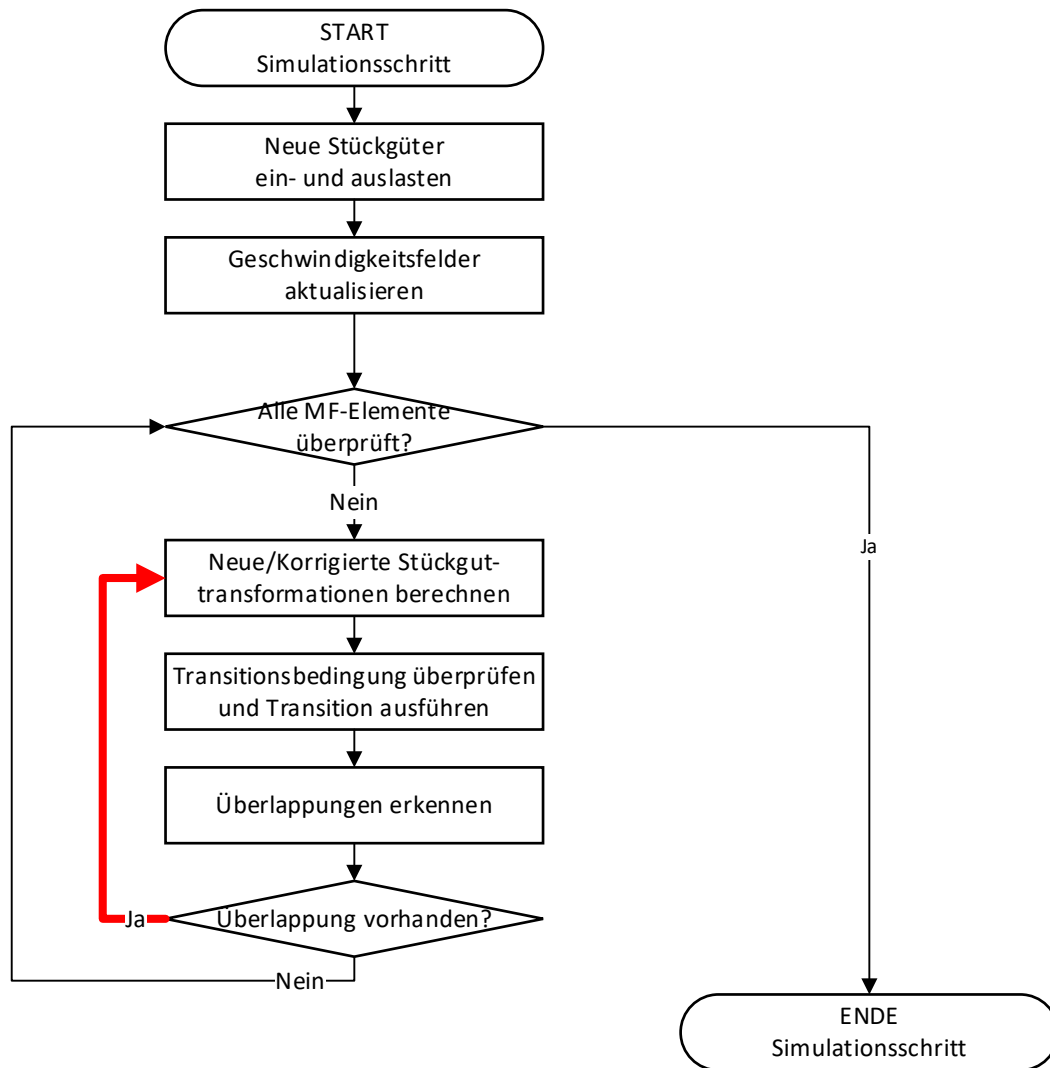


Abbildung 4: Programmablaufplan eines Simulationsschrittes des kinematischen Materialflussmodells (nach (Wischnewski 2007)). Aufgrund der Iterationen beim Auflösen der Überlappungen kann nach diesem Verfahren ein Simulationslauf nur mit durchschnittlichem Zeitdeterminismus gerechnet werden.

3.3.2 Kinetische Materialflussmodelle

Kinetische Materialflussmodelle bilden die Stückgutbewegung anhand **physikalischer Gesetzmäßigkeiten** ab. Dadurch wird ein annähernd wirklichkeitsgetreues Abbild der tatsächlichen Materialbewegung erreicht.

3.3.2.1 Physikalisches Ersatzmodell

Im kinetischen Materialflussmodell wird die Geometrie aller Stückgüter und Materialflusselemente mittels einer geometrischen 3D-Objektbeschreibung abgebildet. Im physikalischen Ersatzmodell werden ergänzend allen Stückgütern und Materialflusselementen physikalische Materialeigenschaften zugewiesen. Darin sind insbesondere die Masse, das Massenträgheitsmoment und verschiedene physikalische Kontakt- und Reibparameter enthalten. Die Objektbeschreibung und die physikalischen Materialeigenschaften bilden Körper, die dann sowohl Stückgüter als auch Materialflusselemente beschreiben. (Göttlich et al. 2014)

Mittels Gelenken können einzelne Körper miteinander verbunden werden, was beispielsweise für die Gelenksimulation von Robotern oder bewegten Abweisern genutzt werden kann. Darüber hinaus können Körpern Geschwindigkeitsfelder auf den jeweiligen Objektflächen zugewiesen werden. Die Geschwindigkeitsfelder sind insbesondere für die Abbildung der Laufrichtung von Fördertechnik sinnvoll.

Als zentrales Kraftfeld wirkt die Gravitationskraft auf alle Körper. Überlappen sich aufgrund der Gravitation zwei Körper wird anhand von physikalischen Gesetzmäßigkeiten eine Kollisionauflösung berechnet. Die Körper werden in der Regel als starre Körper angenommen, was im Kontext der Materialflusssimulation als sinnvoll erachtet werden darf. (Lacour 2012)

3.3.2.2 Mathematisches Modell

Die Positionen der Körper werden im mathematischen Modell durch die lineare Bewegungsdifferentialgleichung nach Newton beschrieben (Gaugele et al. 2008):

$$\frac{dx(t)}{dt} = v(t), \quad (3.2)$$

$$m \frac{dv(t)}{dt} = \sum_{n=1}^N f_n(t),$$

mit dem Positionsvektor $x \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, dem Geschwindigkeitsvektor $v \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, der Masse $m \in \mathbb{R}^+$ und der Summe der N Kraftvektoren $f_n \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, die auf einen Körper wirken.

Die Orientierung ergibt sich aus der Starrkörperdynamik und wird mit der Quaternion $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ beschrieben. Der Vorteil von Quaternionen ist, dass diese eine numerische stabile Beschreibung der Rotation liefern:

$$\frac{d\mathbf{q}(t)}{dt} = \frac{1}{2} [\boldsymbol{\omega}(t), 0] \cdot \mathbf{q}(t). \quad (3.3)$$

wobei $\boldsymbol{\omega}(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ die Winkelgeschwindigkeit eines Körpers zum Zeitpunkt t und $[\boldsymbol{\omega}(t), 0]$ das assoziierte Quaternion $\mathbf{q}$ ist. Die Differentialgleichung für die Winkelgeschwindigkeit lautet dann

$$\boldsymbol{\theta}(t) \frac{d\boldsymbol{\omega}(t)}{dt} = \sum_{n=1}^N \mathbf{r}_n(t) \times \mathbf{f}_n(t) + \sum_{m=1}^M \mathbf{t}_m(t)$$

wobei $\mathbf{t}_m \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ die M Momente, die im Massemittelpunkt wirken, beschreibt. Da es sich um eine Starrkörpersimulation handelt, müssen zusätzlich die N Momente, die sich aus dem Kreuzprodukt des Kontaktpunktes $\mathbf{r}_n(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ und den Kräften $\mathbf{f}_n$ ergeben, berücksichtigt werden.

$\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ist das Massenträgheitsmoment eines Körpers. Dieses wird aus dem Trägheitsmoment im Massemittelpunkt S eines Körpers bestimmt:

$$\boldsymbol{\theta}(t) = \mathbf{R}(t) \cdot \boldsymbol{\theta}^{(S)} \cdot \mathbf{R}^T(t),$$

wobei $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ die Rotationsmatrix ist. $\mathbf{R}$ kann einfach aus $\mathbf{q}$ berechnet werden.

3.3.2.3 Kollisionsauflösung

Durch die Kollisionsauflösung wird verhindert, dass sich zwei Körper durchdringen. Außerdem wird die Gelenksimulation gelöst. Die Kollisionsauflösung wird anhand der physikalischen Eigenschaften berechnet.

Je nach definierten Eigenschaften kann auch die Energieumwandlung durch die Kollision berücksichtigt werden. Der Betrag der Geschwindigkeit ist dann kleiner als vorher. Weiterhin wird Reibung zwischen den Körpern berücksichtigt.

Abhängig von den Berechnungseigenschaften, insbesondere der Laufzeit, der Genauigkeit und dem Zeitdeterminismus wurden verschiedene Verfahren zur Kollisionsauflösung entwickelt (Wriggers 2006), (Bender 2007):

- Kraftbasierte Kollisionsauflösung

Die Wechselwirkungen zwischen zwei Körpern werden direkt über eine Kraft $\mathbf{f}_n$ formuliert, die auf den analytisch-physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Kontaktmechanik basiert (Popov 2010). Dieser Ansatz geht bis zu den Arbeiten der Hertz'schen Pressung zurück und wird insbesondere in der Partikeldynamik (Gaugele et al. 2008), (Kantorovich et al. 2011) und bei der Beschreibung granularer Medien (Langston et al. 1995) eingesetzt. Die Kraft wirkt in die entgegengesetzte Richtung auf die beiden Körper und ist insbesondere abhängig von den jeweiligen Elastizitätsmodulen, den Poisson-Zahlen, den Dämpfungskonstanten, verschiedenen Reibkoeffizienten, der Eindringtiefe und der Relativgeschwindigkeit im Kontaktpunkt.

- Kollisionsauflösung mit Zwangsbedingungen

Bei der Kollisionsauflösung mit Zwangsbedingungen werden die Wechselwirkungen zwischen 2 Körpern i und j in Form zusätzlicher impliziter Funktionen $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ definiert:

$${}^{i,j}\mathbf{c}({}^i\mathbf{x}, {}^j\mathbf{x}) = {}^i\mathbf{x} + {}^j\mathbf{x} > 1$$

Diese impliziten Funktionen werden dann beim Lösen der Bewegungsgleichungen zusätzlich berücksichtigt. Der bekannteste Lösungsalgorithmus für die Kollisionsauflösung mit Zwangsbedingungen ist die Lagrange-Faktoren-Methode. Die impliziten Gleichungen werden über eine Energiebeschreibung gelöst, in der auch die Kontaktdämpfung und die Reibung berücksichtigt werden kann.

Weitere Lösungsverfahren für die Kollisionsauflösung mit Zwangsbedingungen sind die Penalty-Methode, das direkte Verfahren, die Nitsche-Methode, die Grenzwertmethode oder die erweiterte Lagrange-Methode. (Wriggers 2006) Erste Simulationsläufe mit dieser Methode unter Berücksichtigung von Echtzeiteigenschaften wurden von (Barzel et al. 1988) präsentiert und stetig weiterentwickelt (Baraff 1996).

- Impulsbasierte Kollisionsauflösung

Die Wechselwirkungen werden bei der impulsbasierten Kollisionsauflösung über Stöße, dem sogenannten Impuls $\mathbf{p}_n$ modelliert. Ein Impuls ist eine infinitesimal hohe Kraft in einem infinitesimalen kleinen Zeitintervall. Der Impuls wirkt jeweils in entgegengesetzter Richtung auf die beiden Körper. Durch eine zusätzliche algebraische Gleichung wird der Gesamtimpuls in die Bewegungsgleichung integriert:

$$\mathbf{v}(t) = \bar{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{p}_n(t), \quad (3.4)$$

$$\boldsymbol{\omega}(t) = \bar{\boldsymbol{\omega}}(t) + \boldsymbol{\theta}^{-1} \cdot \mathbf{r}_n(t) \times \mathbf{p}_n(t), \quad (3.5)$$

wobei $\bar{\mathbf{v}}$ die Geschwindigkeit direkt vor dem Impuls ist. In der Impulsberechnung werden insbesondere Reibung und Dämpfung berücksichtigt.

Erste Arbeiten zur impulsbasierten Kollisionsauflösung sind in (Moore et al. 1988) dargestellt, die im Laufe der Zeit stetig verbessert wurden (Mirtich et al. 1995), (Bender 2007).

Tritt ein einzelnes Stückgut mit seiner Umgebung in Kontakt, wird eine einseitige Kollisionsauflösung berechnet. Kommt es beispielsweise durch Aufstauen zu mehreren Überlappungen an einem Stückgut, spricht man von einer Kollisionsauflösung mit Mehrfachkontakten. Bei der Simulation von Gelenken liegt eine feste Bindung vor und eine beidseitige Kollisionsauflösung muss berechnet werden.

Sowohl die Berechnung der beidseitigen Kollisionsauflösung als auch die einseitige Kollisionsauflösung mit Mehrfach-Kontakten basiert auf iterativen Algorithmen. Dabei wird solange über die Verfahren iteriert, bis ein stationärer Zustand erreicht wird.

In (Bayer et al. 2008) wurden relevante Lösungsverfahren der impulsbasierten Kollisionsauflösung und der Kollisionsauflösung mit Zwangsbedingungen unter Berücksichtigung von beidseitiger Kollisionsauflösung und Mehrfach-Kontakten miteinander verglichen. Die impulsbasierte Methode schneidet dabei etwas besser bezüglich Genauigkeit und Effizienz ab als die Kollisionsauflösung mit Zwangsbedingungen.

3.3.2.4 Computerrechenbares Simulationsmodell

Im Folgenden wird das computerrechenbare Simulationsmodell eines kinetischen Materialflussmodells beschrieben. Dabei findet die impulsbasierte Kollisionsauflösung Anwendung, da diese Methode im Verlauf der Arbeit näher betrachtet wird.

Die Bewegungsdifferentialgleichung für ein Objekt wird mittels der numerischen Berechnungsvorschrift des expliziten Euler-Verfahrens gelöst:

$$y(t + h) = y(t) + h \cdot f(t), \quad (3.6)$$

y beschreibt dabei die Lösung der Differentialgleichung und f deren rechte Seite.

Die Bestimmung der Impulse und deren Integration ins computerrechenbare Modell (vgl. Gleichung (3.4), (3.5)) erfolgt nach der Berechnung der Geschwindigkeiten, aber vor der Berechnung der Bewegungen. Die Berechnung der Impulse und die Integration werden dabei mehrmals iteriert, bis eine gewünschte Genauigkeit erreicht ist.

Stückgut kann in jedem freien Bereich eingelastet werden. Materialflusselemente müssen dabei nicht über Transitionsbedingungen miteinander verbunden werden.

Die Schritte während der Modellierungsphase des kinetischen Materialflussmodells sind wie folgt:

1. Definition der 3D-Objektbeschreibung und Festlegen von physikalischen Eigenschaften,
2. Approximation von Geschwindigkeitsfeldern an Objektoberflächen,
3. Definition der Stellgrößen der Aktor- und Messsysteme,
4. Definition von Bereichen zum Ein- und Auslasten von Stückgütern.

Zunächst werden alle Materialflusselemente und Stückgüter mittels einer 3D-Objektbeschreibung bestimmt. Dann werden die Geschwindigkeitsfelder an der Objektoberfläche approximiert und die Stellgrößen der Aktor- und Messsysteme modelliert. Zuletzt werden die Bereiche zum Ein- und Auslasten von Stückgut definiert.

In Abbildung 5 ist der Programmablaufplan für einen Simulationsschritt dargestellt. Wegen der iterativen Berechnung der Impulse kann dieses Modell nicht realzeitdeterministisch berechnet werden. Weiterhin ist unklar ob die Kollisionserkennung, also das Überprüfen auf Überlappungen, realzeitdeterministisch gelöst werden kann. Bislang wurden Simulationsläufe nur bezüglich der Echtzeit untersucht.

Bereits bei einer Simulation von unter 100 Stückgütern kann das Kriterium für durchschnittlichen Zeitdeterminismus nicht mehr erfüllt werden. (Reinhart et al. 2010a) Ein Simulationslauf in Echtzeit ist dann nicht mehr möglich.

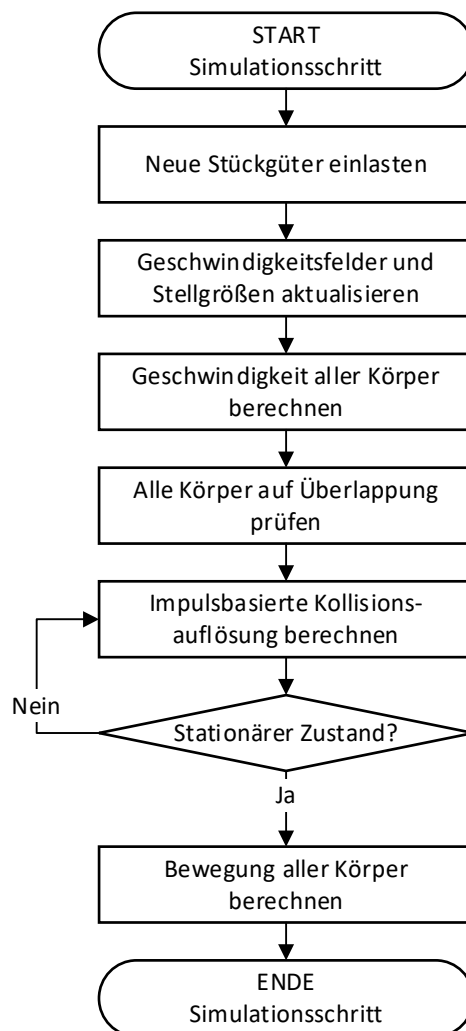


Abbildung 5: Programmablaufplan eines Simulationsschrittes des kinetischen Materialflussmodells

3.3.3 Zusammenfassung

Wenn man die zuvor genannten Materialflussmodelle auf die in die Kapitel 3.1 eingeführten Simulationsplattformen überträgt, so entsteht Tabelle 3. Die Simulation bzw. Emulation der Steuerungsfunktionen und der Hardware (siehe Tabelle 1, a-d) kann mit allen Materialflussmodellen erfolgen. Dies gilt auch, wenn die reale Hardware mit Steuerungsfunktionen über eine virtuelle Zeitleiste (siehe Tabelle 1, e) angebunden wird. Ein Simulationslauf der realen Hardware mit Steuerungsfunktionen an der Echtzeit-Materialflusssimulation kann ohne Einschränkungen nur mit den kinematischen Materialflussmodellen erfolgen. Die kinetischen Materialflussmodelle eignen sich nur dann, wenn eine geringe Anzahl an Stückgütern simuliert werden sollen. Falls eine Realzeit-Simulationsplattform zum Einsatz kommen soll, eignet sich nun mehr nur noch das kinematische Materialflussmodell in der Umsetzung des Simulationswerkzeuges ISG-virtuos.

Tabelle 3: Materialflussmodelle sortiert unter den Simulationsplattformen aus Kapitel 3.1 und Tabelle 1

Materialflussmodelle	Simulationsplattformen aus Tabelle 1		
	Nicht-Echtzeit (a, b, c, d, e)	Echtzeit (f)	Realzeit (g)
Kinetisches Materialflussmodell (Machineering, über 100 Stückgüter)	x		
Kinetisches Materialflussmodell (Machineering, unter 100 Stückgüter)	x	x	
Kinematisches Materialflussmodell (Ciros)	x	x	
Kinematisches Materialflussmodell (ISG-virtuos)	x	x	x

3.4 Kollisionserkennung

Sowohl im kinematischen, als auch im kinetischen Materialflussmodell müssen Überlappungen während des Simulationslaufs sicher erkannt werden. Mit Hilfe der Kollisionserkennung

wird anhand der Objektbeschreibung ermittelt, ob sich Körper berühren beziehungsweise durchdrungen haben. In diesem Fall werden die benötigten Kollisionsinformationen wie der Kontaktpunkt, die Kontaktnormale und die Eindringtiefe berechnet.

Die Tests für die Kollisionsprüfung zwischen zwei geometrischen Objektbeschreibungen (kurz: Objekte) sind dabei bezüglich der Zielsetzung hoch optimiert. (Lin et al. 1998), (Jiménez et al. 2001), (Ericson 2005) Werden in einer Materialflusssimulation mehrere hundert Körper simuliert, kann die Rechenzeit aber trotzdem schnell stark zunehmen und die Rechenleistung der aktuellen Prozessoren übersteigen. Bei der einfachsten Kollisionserkennung mit der sogenannten Exhaustionsmethode wird für jedes Objekt mit jedem anderen Objekt eine Kollisionsprüfung durchgeführt. Die Anzahl an möglichen Kollisionsprüfungen steigt dabei quadratisch mit der Anzahl an Objekten an:

$$\mathcal{O}_{\text{Exhaustion}}^{\text{Kollisionsprüfungen}}(n_{\text{Objekte}}^2) = \frac{n_{\text{Objekte}}(n_{\text{Objekte}}-1)}{2},$$

wobei n_{Objekte} die Gesamtanzahl aller Objekte beschreibt und $\mathcal{O}_{\text{Exhaustion}}^{\text{Kollisionsprüfungen}}$ das Landau-Symbol, also die Komplexität der Kollisionsprüfungen bezüglich der Exhaustionsmethode, beschreibt.

Selbst wenn die Kollisionsprüfung zwischen zwei Objekten also sehr recheneffizient ist, können schon wenige Objekte die vorhandene Rechenkapazität pro Zeitschritt durch den quadratischen Anstieg der Kollisionsprüfungen übersteigen. In Tabelle 4 ist diese Tatsache bei einer angenommenen Laufzeit von nur 15 μs für eine Kollisionsprüfung dargestellt. Bei einem Simulationsschritt von 1 Millisekunde wäre bereits bei 12 Objekten die vorhandene Rechenkapazität vollständig aufgebraucht.

Tabelle 4: Laufzeit einer Kollisionserkennung mit der Exhaustionsmethode in Abhängigkeit der Anzahl an Objekt bei einer angenommenen Laufzeit von 15 µs pro Kollisionsprüfung

Anzahl an Objekten	Anzahl an möglichen Kollisionsprüfungen	Berechnungszeit [µs]
2	1	15 µs
10	45	675 µs (0,7 ms)
100	4950	74250 µs (74,2 ms)
1000	499500	7492500 µs (7,5 s)

Um möglichst viele Kollisionsprüfungen vor einer tatsächlichen Kollisionsprüfung ausschließen zu können wurden verschiedene Strategien zur Komplexitätsreduktion entwickelt und sind beispielsweise in (Ericson 2005) zusammengefasst worden:

- Raumaufteilungsverfahren

Bei den Raumaufteilungsverfahren werden die Kollisionsobjekte verschiedenen Gebieten zugeordnet. So kann die Anzahl der gesamten Kollisionsüberprüfungen schon durch die Aufteilung in zwei Gebiete deutlich reduziert werden, da

$$n_{\text{Objekte},\Omega 1}^2 + n_{\text{Objekte},\Omega 2}^2 \ll n_{\text{Objekte}}^2$$

gilt. n_{Objekte} beschreibt dabei die Gesamtanzahl an Objekten, $n_{\text{Objekte},\Omega 1}$ die Anzahl der Objekte in Gebiet 1 und $n_{\text{Objekte},\Omega 2}$ die Anzahl der Objekte in Gebiet 2. Wird nun angenommen, dass nur eine geringe Anzahl an Objekten die Gebietsgrenzen pro Zeitschritt überschreitet, können diese Verfahren sehr effizient umgesetzt werden. Man spricht dann von einer zeitlichen und räumlichen Kohärenz in der Objektbewegung. (Spitzweg 2009)

- Hüllkörperverfahren

Bei den Hüllkörperverfahren wird versucht die quadratische Anzahl an Kollisionsprüfungen auf die tatsächliche Anzahl an notwendigen Kollisionsprüfungen zu reduzieren. Dafür werden um die Objekte primitive Hüllkörper gelegt und anhand von effizienteren Kollisionserkennungstests für Hüllkörper eine Vorauswahl getroffen. Wird nun angenommen, dass sich pro Zeitschritt nur wenige Objekte bewegen, können die Hüllkörperverfahren sehr effizient umgesetzt werden. (Spitzweg 2009)

Bei der tatsächlichen Kollisionsprüfung wird anhand der Objektbeschreibung zweier Objekte eine Kontaktbestimmung durchgeführt. Je nach Objektbeschreibung und -eigenschaften, sowie den benötigten Kontaktinformationen sind zahlreiche problemoptimierte Kollisionsprüfungsverfahren bekannt. Oft werden bei der Kollisionsprüfung keine exakte Objektbeschreibung, sondern primitive Hüllkörper, zugrunde gelegt, um die Laufzeit pro Kollisionsprüfung zu reduzieren. (Ericson 2005) Erwartungsgemäß gilt in der Regel, dass weniger detaillierte Objektbeschreibungen laufzeiteffizienter als detaillierte Objektbeschreibungen sind.

Entsprechend der Zielsetzung können die unterschiedlichen Verfahren kombiniert werden, um eine möglichst effiziente Kollisionserkennung zu realisieren. Dies ist aber nur unter Kenntnis des Anwendungsfalles und der getroffenen Annahmen möglich. Beispielsweise sind infolge der realisierten Kollisionsauflösung im Materialflussmodell unterschiedliche Kontaktinformationen notwendig oder anhand der erwarteten Objektverteilung und -bewegungen eignen sich Raumaufteilungs- oder Hüllkörperverfahren besser.

Das Zusammenspiel aus Strategien zur Komplexitätsreduktion und der Kollisionsprüfungen zwischen zwei Objekten wird im Folgenden als Kollisionserkennung bezeichnet.

3.5 Materialflussmodelle im Entwicklungsprozess

Die Entwicklung des Materialflusssystems erfolgt in mehreren Phasen:

- Angebotsphase

In der Angebotsphase wird ein simulationsbasierter Vergleich von verschiedenen Layout-Varianten durchgespielt, um Funktionsweise, Leistungserbringung, Leistungsgrenzen, Engpässe und Durchlaufgeschwindigkeiten zu identifizieren. (Neyrinck et al. 2012) So kann bereits nach der Angebotsphase simulationsbasiert das optimale Layout des Materialflusssystems identifiziert werden. In (Neyrinck et al. 2012) wird dafür ein **kinematisches Materialflussmodell** eingesetzt (siehe Abbildung 6). Gegenüber den kinetischen Materialflussmodelle ergibt sich der Vorteil, dass bereits ohne Detailwissen ein Simulationslauf durchgeführt werden kann.

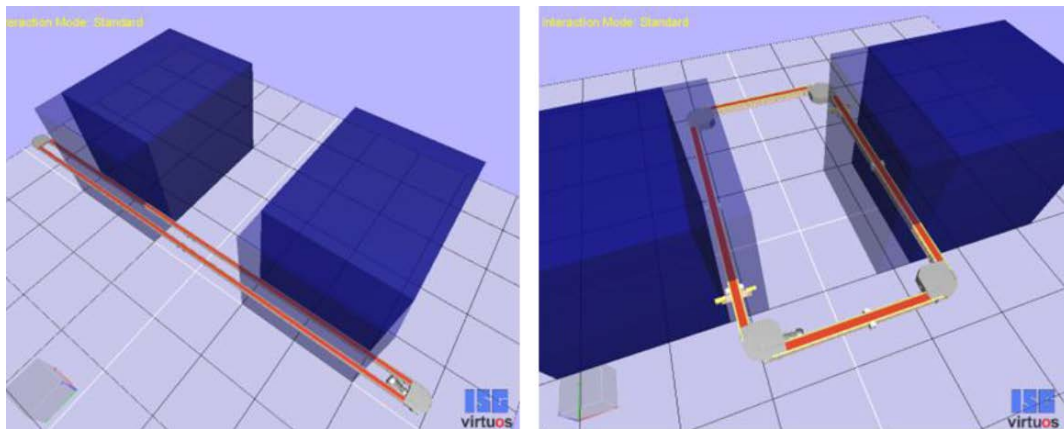


Abbildung 6: Simulationsbasierte Ermittlung des optimalen Layouts in der Angebotsphase mit einem kinematischen Materialflussmodell (aus (Neyrinck et al. 2012))

- Planungsphase

Auch wenn in der Planungsphase die reale Hardware noch nicht zur Verfügung steht, können mit dem vorhandenen kinematischen Materialflussmodell die Steuerungsfunktionen während der Entwicklung konzipiert werden. Außerdem können direkt Kriterien für die Auswahl der Steuerungshardware abgeleitet werden. Dadurch können bereits in der Planungsphase durch die Simulation erste „Optimierungsprozesse“ angestoßen werden. (Meier et al. 2000) Wunsch (Wunsch 2007) fordert hierbei den Einsatz eines **kinetischen Materialflussmodells**, um bei den Simulationsläufen eine möglichst hohe Übereinstimmung mit den endgültigen Steuerungsfunktionen zu erreichen. In Abbildung 7 ist die Simulation von Transportkörben aus (Reinhart et al. 2010a) mit einem kinetischen Materialflussmodell in der Planungsphase dargestellt.

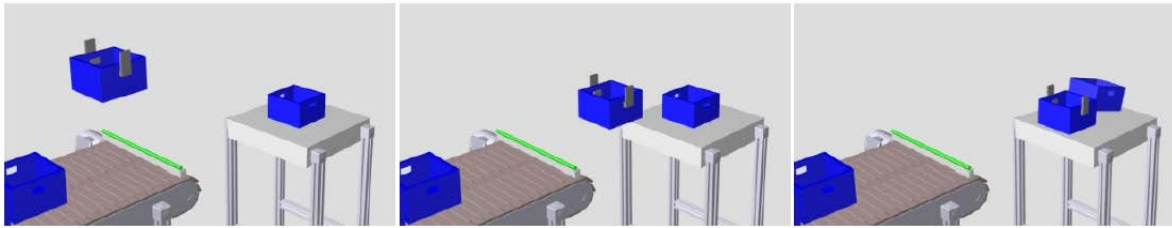


Abbildung 7: Materialflusssimulation von Transportkörben mit einem kinetischen Materialflussmodell in der Planungsphase zur Identifikation und Optimierung der Steuerungsfunktionen (aus (Reinhart et al. 2010a))

- Realisierungsphase

In der Realisierungsphase wird das Anlaufverhalten der **einzelnen Elemente des Materialflusssysteme** ermittelt. Unter Einbeziehung der realen Steuerungshardware mit den Steuerungsfunktionen und der Materialflusssimulation ist es bereits vor Fertigstellung des Materialflusssysteme möglich, die realen Steuerungssysteme mit den Steuerungsfunktionen zu testen und zu validieren. In Abbildung 8 ist die Simulation von 40 Flaschen auf einem Stetigförderer mit einem **kinetischen Materialflussmodell** aus (Reinhart et al. 2010a) dargestellt. Bereits hier wird eine Laufzeit von bis zu 16 Millisekunden pro Simulationsschritt erreicht.

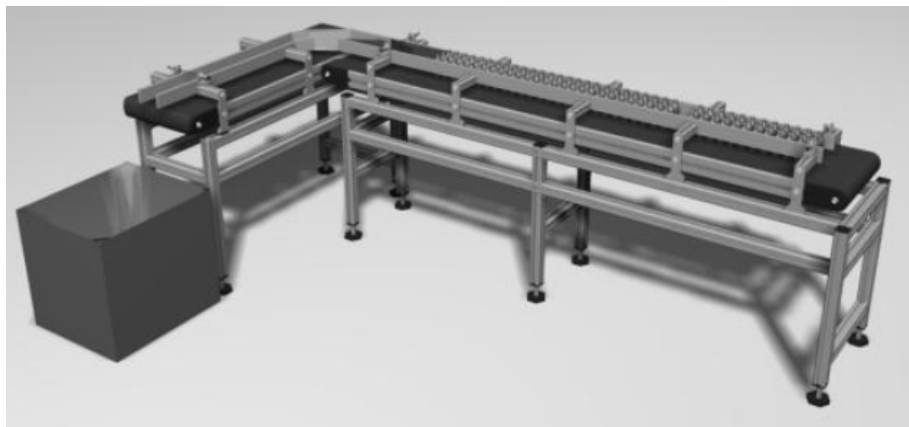


Abbildung 8: Virtuelle Inbetriebnahme in der Realisierungsphase mit einem kinetischen Materialflussmodell (aus (Reinhart et al. 2010a)). Die Simulation des Transportes von rund 40 Flaschen erreicht eine Laufzeit von bis zu 16 Millisekunden.

- Inbetriebnahmephase

Das Hauptziel des Simulationseinsatzes in der Inbetriebnahmephase ist die möglichst effiziente und schnelle Durchführung der realen Inbetriebnahme des **gesamten Materialflusssystems**. (VDI 3633-8) Dazu gehören Grenzwerttests und Tests des kooperierenden Verhaltens zwischen verschiedener Steuerungshardware. Da die Simulation der einzelnen Materialflusselemente mit den kinetischen Materialflussmodellen den durchschnittlichen Zeitdeterminismus übersteigt, werden in der Inbetriebnahmephase typischerweise die recheneffizienteren **kinematischen Materialflussmodelle** eingesetzt (siehe Abbildung 9). Mit diesen Modellen können mehrere hundert Stückgüter, teils sogar mit realzeitdeterministischen Berechnungseigenschaften, simuliert werden.

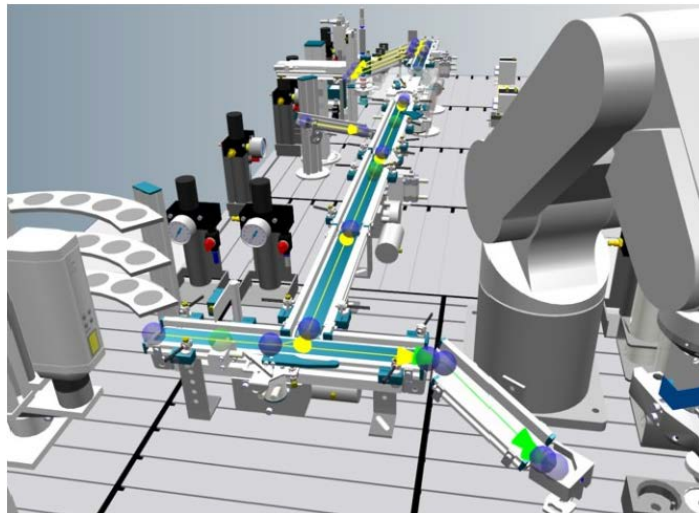


Abbildung 9: Virtuelle Inbetriebnahme mit einem kinematischen Materialflussmodell (aus (Wischnewski et al. 2010))

3.6 Gekoppelte Materialflussmodelle

Reinhart und Wunsch (Reinhart et al. 2007) stellen fest, dass beim Einsatz mehrerer unterschiedlicher Materialflussmodelle während des Entwicklungsprozess die Kohärenz zwischen den Modellen verloren gehen kann. Min et al. (Min et al. 2002) stellen außerdem einen erheblichen, unnötigen Mehraufwand durch die doppelte Modellierung und Validierung der Materialflussmodelle fest. Gekoppelte Materialflussmodelle stellen hier einen

neuen Ansatz dar. Ein gekoppeltes Materialflussmodell ermöglicht es, ohne Neumodellierung zwischen den verschiedenen Materialflussmodellen zu wechseln bzw. Teilmodelle über geeignete Mechanismen zu koppeln. Dadurch können die oben beschriebenen Probleme relativiert werden oder sogar ganz umgangen werden.

Prinzipiell gibt es für die Kopplung von kinematischen und kinetischen Materialflussmodellen in einem gekoppelten Materialflussmodell zwei Möglichkeiten (Kübler et al. 2000b), (Hoher et al. 2011b):

- Integrative Kopplung der mathematischen Materialflussmodelle

Die unterschiedlichen Materialflussmodelle werden in einem mathematischen Gesamtmodell vereint und bei der Programmerstellung in ein gemeinsames Simulationsmodell überführt. Dafür muss eine gemeinsame Basis für das gemeinsame mathematische Modell gegeben sein. Einen Überblick über integrativ gekoppelte Modelle für unterschiedliche Industrieanwendungen wird in (Boer 2005) gegeben.

- Separative Kopplung der computerrechenbaren Simulationsmodelle

Bei der separativen Kopplung werden die gekoppelten Materialflussmodelle getrennt voneinander in eigenständigen computerrechenbaren Simulationsmodellen gelöst. Für die Berechnung werden jeweils optimierte Berechnungsalgorithmen eingesetzt und gleichzeitig ausgeführt. Während des Simulationslaufs findet zwischen den Simulationsmodellen zu definierten Zeitpunkten ein Datenaustausch statt. So wird die richtige Lösung des Gesamtsystems erreicht. Dafür müssen insbesondere geeignete Schnittstellen für Datentransfer und Synchronisation der Simulationsmodelle geschaffen werden. Ein Überblick über die separative Kopplung ist in (Felippa et al. 2001) ausgeführt.

In (Hoher et al. 2012) wurde ein kinematisches und kinetisches Materialflussmodell mit einer separativen Kopplung beschrieben. Wichtige physikalische Systemeigenschaften können durch die kinetische Materialflusssimulation wesentlich besser dargestellt werden, als mit einer reinen kinematischen Materialflusssimulation. Allerdings zeigt sich eine deutlich höhere Berechnungsdauer wegen des kinetischen Materialflussmodelles, weshalb nur noch ein durchschnittlicher Determinismus gegeben ist und dieser Ansatz nur für eine geringe Anzahl an Stückgütern möglich ist. Dadurch kann das gekoppelte Materialflussmodell nicht

mehr durchgängig zur Entwicklungsunterstützung von Materialflusststeuerungen eingesetzt werden.

Ein gekoppeltes kinematisches und kinetisches Materialflussmodell mit einer integrativen Modellkopplung wurde in (Wischnewski et al. 2010) beschrieben. Allerdings wird hier nur ein ausgewählter physikalischer Effekt in das mathematische Modell integriert, namentlich das Rutschen von Stückgut von einer Rampe. Ein Wechsel zwischen beiden Modellansätzen ist dort nicht möglich. Eine vollständige integrative Kopplung der Modellansätze gelang ebenfalls nicht. Durch dieses Vorgehen konnte zwar punktuell die Genauigkeit des Simulationslaufs gesteigert werden, allerdings reicht die erreichte Genauigkeit nicht aus, um dieses Materialflussmodell durchgängig über alle Entwicklungsphasen einzusetzen.

Während die Notwendigkeit eines gekoppelten Materialflussmodells von verschiedenen Seiten festgestellt wurde (Min et al. 2002), (Reinhart et al. 2007), konnte bislang kein überzeugendes Konzept einer Kopplung vorgelegt werden.

3.7 Durchgängige Materialflussmodelle

Ein durchgängiges Materialflussmodell kann in allen Entwicklungsphasen zur Entwicklungsunterstützung von Materialflusststeuerungen genutzt werden. Unter einem durchgängigen Materialflussmodell wird verstanden, dass über alle Entwicklungsphasen eine ausreichende Genauigkeit und Robustheit gegeben ist. In der Realisierungsphase soll das durchgängige Materialflussmodell zusätzlich einen durchschnittlichen Determinismus aufweisen, während in der Inbetriebnahmephase realzeitdeterministische Berechnungseigenschaften notwendig werden. Ein durchgängiges Materialflussmodell erfüllt also immer die entsprechenden simulationstechnischen Anforderungen.

Das Fehlen eines durchgängigen Materialflussmodells wird beispielsweise in (Seidel et al. 2012) beklagt. Aktuell wird es aufgrund der hohen Berechnungsdauer des kinetischen Materialflussmodells notwendig, mindestens einen Modellwechsel nach der Realisierungsphase zu einem kinematischen Materialflussmodell vorzunehmen. Nur dadurch kann die Forderung nach durchschnittlichem Determinismus bzw. Realzeitdeterminismus erfüllt werden.

3.8 Zusammenfassung

In Tabelle 5 sind die möglichen Materialflussmodelle zur Entwicklungsunterstützung von Materialflusssteuerungen den entsprechenden Entwicklungsphasen zugeordnet. Zu Beginn der Entwicklung werden in der Angebotsphase die kinematischen Materialflussmodelle wegen ihrer Einfachheit präferiert. Für möglichst detaillierte Simulationsläufe erfolgt während der Planungs- und Realisierungsphase ein Wechsel zu kinetischen Materialflussmodelle. Dabei werden meist nur Teilsysteme des Materialflusssystems simuliert um die Entwicklung der einzelnen Steuerungssysteme zu unterstützen. In der Inbetriebnahmephase wird dann das Zusammenspiel aller Steuerungssysteme überprüft. Da die kinematischen Materialflussmodelle eine deutlich niedrigere (realzeitdeterministische) Berechnungsdauer aufweisen kann dieser Schritt auch nur mit diesen erfolgen.

Tabelle 5: Entwicklungsphasen sortiert unter den Materialflussmodellen

Entwicklungsphase	Materialflussmodell		
	Kinematisch	Kinetisch	Gekoppelt
Angebotsphase	x		x
Planungsphase		x	x
Realisierungsphase		x	x
Inbetriebnahmephase	x		x

Durch die vollständige integrative Kopplung der beiden Modellansätze könnte auf den ständigen Modellwechsel verzichtet werden. Die Modellkopplung muss dann derart erfolgen, dass sowohl die ausreichende Genauigkeit gegeben ist und zumindest in der Inbetriebnahmephase auch realzeitdeterministische Berechnungseigenschaften. Außerdem muss es möglich sein, dass Materialflussmodell über den Entwicklungsprozess zu detaillieren und an neue Anforderungen anzupassen. Der Versuch die Materialflussmodelle miteinander zu koppeln wurde bereits in verschiedenen Arbeiten unternommen, allerdings konnten dabei niemals gleichzeitig alle der oben genannten Anforderungen erfüllt werden.

Kapitel 4

Anforderungsanalyse

Aus dem Stand der Technik wird deutlich, dass heute in jeder Entwicklungsphase individuelle Simulationslösungen bedarfsgerecht erstellt werden. Für jedes neu erstellte Modell muss zuvor dessen Eignung für den Simulationseinsatz sichergestellt werden, das heißt ein erneuter Nachweis der Modellvalidität erfolgen. Daraus ergibt sich die Problemstellung für diese Arbeit, nämlich dass ein hoher Zeitaufwand für die Erstellung der Materialflussmodelle und den Nachweis der Modellvalidität notwendig ist.

Wie zuvor gezeigt, würde ein **gekoppeltes Materialflussmodell (GMM)**, also ein gekoppeltes kinematisches und kinetisches Materialflussmodell, diese Problemstellung auflösen. Die resultierenden Anforderungen an ein solches GMM sind:

- Wiederverwendbarkeit eines erstellten Materialflussmodells über den gesamten Entwicklungsprozess von Materialflussteuerungen,
- Realzeitdeterministische Berechnungseigenschaften während der Inbetriebnahme-phase und
- Ein einheitliches Modellierungskonzept.

Wiederverwendbare Modelle benötigen eine gemeinsame Modellbasis mit einem einheitlichen Parametersatz, die sowohl die Simulationseigenschaften der kinematischen als auch die Simulationseigenschaften der kinetischen Materialflussmodelle abdeckt. Der Benutzer des Simulationswerkzeuges kann dann jederzeit festlegen, ob eine kinematische oder kinetische Simulation ausgeführt wird. Damit entscheidet er über die Genauigkeit, Robustheit, den Zeitdeterminismus, die Berechnungsdauer und das Realzeitspeichermanagement des Simulationslaufs. Für den Einsatz des GMMs während der Inbetriebnahmephase, ist sicherzustellen, dass eine realzeitdeterministische Berechnung möglich ist.

Die kinetische Simulation im GMM soll die Kontaktsituation realitätsgetreu auflösen, kann dafür aber nicht mit realzeitdeterministischen Berechnungseigenschaften gelöst werden.

Die kinematische Simulation bildet weniger physikalische Effekte ab, soll dafür aber realzeitdeterministische Berechnungseigenschaften aufweisen.

Momentan sind unterschiedliche Modellierungsschritte bei der Anwendung von kinematischen und kinetischen Materialflussmodellen notwendig. Dies liegt an der zusätzlichen Definition von Transitionsbedingungen im kinematischen Materialflussmodell. Daher ist es notwendig für das GMM ein einheitliches Modellierungskonzept zu entwerfen, was idealerweise durch den Verzicht von Transitionsbedingungen ermöglicht werden würde. Zudem muss die Parametrierung der Modelle auf einem einheitlichen Parametersatz beruhen.

Die Hauptschwierigkeit in dieser Arbeit liegt also darin, die kinematischen und kinetischen Materialflussmodelle so in einem GMM zu koppeln, so dass die oben genannten Anforderungen alle erfüllt werden können. Der Weg dahin ist in Abbildung 10 zusammengefasst.



Abbildung 10: Anforderungsanalyse

Aus der Anforderungsanalyse können nun Hypothesen aufgestellt werden, die das wissenschaftliche Forschungsanliegen dieser Arbeit darstellen. Durch die Ergebnisse der Kapitel 5 bis 8, sollen diese verifiziert werden:

- Die gängigen Materialflussmodelle zur Entwicklungsunterstützung von Materialflusssteuerungen können in einem gekoppelten Materialflussmodell zusammengefasst werden.

- Das gekoppelte Materialflussmodell kann durchgängig über alle Entwicklungsphasen eingesetzt werden. Durch die Kopplung gehen keine simulationstechnischen Anforderungen zur Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen in der jeweiligen Entwicklungsphase verloren.
- Mit dem gekoppelten Materialflussmodell kann der Modellierungsaufwand gegenüber entwicklungsphasenspezifischen Materialflussmodellen in den Entwicklungsphasen reduziert werden, d. h. es ergibt sich ein Zeitersparnis über den gesamten Entwicklungsprozess.
- Die Aussagekraft des gekoppelten Materialflussmodells ist mindestens genauso hoch wie die der bisherigen, individuellen und entwicklungsphasenspezifischen Materialflussmodelle.

Kapitel 5

Ein gekoppeltes Materialflussmodell (GMM)

Ein gekoppeltes Materialflussmodell ermöglicht es, ohne Neumodellierung des Materialflusssystems Simulationsläufe mit einem kinematischen und kinetischen Materialflussmodell durchzuführen. Die Materialflussmodelle müssen dabei so miteinander gekoppelt werden, dass jederzeit ein Wechsel des gesamten Modells möglich ist. Dadurch wird entweder ein Simulationslauf mit einer sehr hohen Genauigkeit oder ein Simulationslauf mit realzeit-deterministischen Berechnungseigenschaften ermöglicht.

Die Kopplung von Materialflussmodellen in einem gemeinsamen Materialflussmodell kann durch verschiedene Herangehensweisen mittels integrativer oder separativer Kopplung gelöst werden. Im vorherigen Kapitel wurden die speziellen Anforderungen an das benötigte GMM formuliert, anhand deren nun die geeignete Kopplung und Modellbasis hergeleitet wird. Die konstruktive und experimentelle Bewertung ermöglicht es im Anschluss Aussagen über die Richtigkeit der Herangehensweise zu treffen.

Die Kenntnis über alle benötigten Kontaktinformationen und deren realzeitdeterministischen Berechnung werden vorausgesetzt. Eine gesonderte Behandlung der realzeitdeterministischen Kollisionserkennung erfolgt in Kapitel 6.

5.1 Modellkopplung

Bei einer separativen Modellkopplung werden beide Materialflussmodelle ohne Änderungen der computerrechenbaren Simulationsmodelle miteinander gekoppelt. Stückgüter können dann an definierten Knoten in dem einen Materialflussmodell ausgelastet werden und zeitgleich im Anderen eingelastet werden.

Da ein Modellwechsel nur an definierten Punkten möglich ist, hat die separative Modellkopplung eine sehr niedrige Flexibilität. Durch die Kopplung kann zwar die Genauigkeit in

einzelnen Bereichen erhöht werden, allerdings blieben die jeweiligen Berechnungseigenschaften erhalten. Erfüllt eines der Modelle beispielsweise den Realzeitdeterminismus nicht, erfüllt auch das Gesamtmodell diesen nicht. Weiterhin kann durch eine separative Modellkopplung kein beliebiger Wechsel zwischen den Materialflussmodellen in den jeweiligen Teilbereichen erfolgen. Der geänderte Bereich muss mit dem jeweiligen Materialflussmodell vollständig neu erstellt werden.

Wegen dieser Nachteile wird die separativer Modellkopplung den gestellten Anforderungen an das GMM nicht gerecht. Bei einer **integrativen Kopplung** werden die beiden Modelle in einer gemeinsamen mathematischen Modellbasis vereint. Idealerweise wird eine vollständige Integration der beiden Modellbasen in einem Gesamtmodell angestrebt. Dann kann ein Modellwechsel zwischen kinematischen und kinetischen Materialflussmodellen zu jedem beliebigen Zeitpunkt durchgeführt werden. Es muss lediglich festgelegt werden, welches der beiden Materialflussmodelle ausgeführt werden soll. Durch eine vollständige integrative Kopplung entstehen wiederverwendbare Modelle, die jederzeit detailliert werden können. Daraus lässt sich dann auch ein einheitliches Modellierungskonzept ableiten.

Da sich die beiden Modelle stark voneinander unterscheiden (vgl. Kapitel 3.3.1.3 und Kapitel 3.3.2.4), muss zunächst eine gemeinsame Modellbasis gefunden werden. Diese soll eine realzeitdeterministische Berechnungseffizienz während des kinematischen Simulationslaufs und eine hohe Genauigkeit während des kinetischen Simulationslaufs aufweisen.

Ziel der nachfolgenden Beschreibung ist also eine vollständige integrative Kopplung der kinematischen und kinetischen Materialflussmodelle zu einem GMM.

5.2 Modellbasis

5.2.1 Physikalisches Ersatzmodell

Das physikalische Ersatzmodell des GMMs folgt der Beschreibung des kinetischen Materialflussmodells aus Kapitel 3.3.2.1 und unterscheidet sich von diesem nicht.

Im Folgenden kann nun aber zwischen zwei Kollisionsauflösungen gewählt werden, wobei immer eine davon vor Beginn eines Simulationslaufs ausgewählt muss:

- Kinematische Kollisionsauflösung

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine kinematische Kollisionsauflösung formuliert, die auf einer reinen kinematischen Betrachtungsweise der Kontaktsituation beruht.

- Kinetische Kollisionsauflösung

Die kinetische Kollisionsauflösung folgt dem Stand der Technik und wird wie beispielsweise in (Bender 2007) beschrieben unverändert eingesetzt.

5.2.2 Mathematisches Ersatzmodell

Die Positionen und Orientierungen im mathematischen Modell des GMMs werden wie beim kinetischen Materialflussmodell mit Hilfe der physikalischen Bewegungsgleichung nach Newton und der Starrkörperdynamik berechnet (vgl. Gleichungen (3.2), (3.3)). Die Kollisionsauflösung erfolgt anhand des impulsbasierten Ansatzes (vgl. Gleichungen (3.4), (3.5)).

Bei der Berechnung der Impulse mit der kinematischen Kollisionsauflösung wird nun angenommen, dass Stückgut die Materialflusselemente nicht bewegen kann. Deshalb besitzen alle Materialflusselemente die Masse $^{ME}m = \infty$ und das Massenträgheitsmoment $^{ME}\Theta = \infty \cdot \mathbf{E}_3$, wobei $\mathbf{E}_3$ die Einheitsmatrix im euklidischen Raum ist. Die Bewegung von Materialflusselementen kann folglich nur durch Aktorsysteme beeinflusst werden. Der Einfluss der Gravitation auf die Gelenke bleibt unberücksichtigt.

Die Masse und das Massenträgheitsmoment der Stückgüter werden bei der kinematischen Kollisionsauflösung nicht betrachtet. Diese werden daher bei einer kinematischen Kollisionsauflösung zu $^{SG}m = 1$ und $^{SG}\Theta = \mathbf{E}_3$ gesetzt. Bei einer kinematischen Kollisionsauflösung wirken die Impulse immer im Massemittelpunkt der Stückgüter. Dadurch kann das Stückgut durch die kinematischen Impulse nicht rotiert werden. Die Rotationsgeschwindigkeit der Stückgüter wird deshalb, wie bei dem kinematischen Materialflussmodell im Stand der Technik (vgl. Kapitel 3.3.1), anhand kinematischer Annahmen festgelegt.

Durch diese Vereinfachungen ist das mathematische Ersatzmodell auch für eine kinematische Materialflusssimulation geeignet. Mittels einer integrativen Kopplung der mathematischen Materialflussmodelle konnte eine durchgängige Kopplung hergeleitet werden. Das

gekoppelte Materialflussmodell kann dabei jederzeit detailliert werden. Dieser Ansatz ermöglicht es dann vor jedem Simulationslauf zwischen einer hohen Simulationsgenauigkeit mittels der kinetischen Kollisionsauflösung oder den realzeitdeterministischen Berechnungseigenschaften mittels der kinematischen Kollisionsauflösung auszuwählen.

Die Berechnung der kinematischen Impulse wird ab Kapitel 5.3 gesondert erläutert. Im folgenden Kapitel wird das computerrechenbare Simulationsmodell diskutiert.

5.2.3 Computerrechenbares Simulationsmodell

Durch die Gravitation ergibt sich die vorläufige Geschwindigkeit $\bar{\mathbf{v}}_{k+1}$ zu:

$$\bar{\mathbf{v}}_{k+1} = \mathbf{v}_k + h \cdot \mathbf{g}.$$

Der Hochzeichenindex SG links vom Grundzeichen für Stückgüter wird aus Gründen der Lesbarkeit nicht mehr mitgeführt. Fehlt der Hochzeichenindex links vom Grundzeichen, bezieht sich die Variable in allen nachfolgenden Ausführungen immer auf Stückgüter.

Danach erfolgen die Bestimmung der Impulse und deren Integration ins Materialflussmodell:

$$\mathbf{v}_{k+1} = \bar{\mathbf{v}}_{k+1} + {}^i m^{-1} \cdot \mathbf{p}_k, \quad (6.1)$$

wobei $\mathbf{p}_k$ zunächst die Summe aller Impulse sein soll, die auf ein Stückgut zum Zeitpunkt t_k wirkt:

$$\mathbf{p}_k = \sum_{i=1}^I {}^i \mathbf{p}_k$$

Im kinetischen Modell wird die Geschwindigkeit $\mathbf{v}_{k+1}$ und der Impuls $\mathbf{p}_k$ mit einer Kollisionsauflösung nach Poisson (vgl. (Bender 2007)) mehrmals iterativ berechnet, bis ein stationärer Zustand erreicht wird.

Um bei einer kinematischen Kollisionsauflösung eine iterative Berechnung zu vermeiden, wird in den nachfolgenden Kapiteln ein spezialisiertes Verfahren entwickelt. Dadurch kann schon bei einmaliger Berechnung des Impulses $\mathbf{p}_k$ das computerrechenbare Simulationsmodell durch Anwenden von Formel (6.1) gelöst werden.

Die kinematische Kollisionsauflösung für die kinematische Materialflusssimulation ist eine Vereinfachung und Spezialisierung der Methode von Bender (Bender 2007) Dabei handelt

es sich um ein Verfahren aus impulsbasierter Kollisionsauflösung, Kontaktgraph, Schockfortpflanzung und Priorisierung.

Für die kinetische Kollisionsauflösung ergibt sich die Winkelgeschwindigkeit ω_{k+1} zu

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \Theta^{-1} \cdot \sum_{i=1}^I {}^i r_k \times {}^i p_k, \quad (6.2)$$

wobei ${}^i r_k$ den Ortsvektor vom Massemittelpunkt zum Kontaktpunkt beschreibt. Im kinetischen Materialflussmodell wird Gleichung (6.2) ebenfalls iterativ bestimmt.

Bei der kinematischen Kollisionsauflösung wird die Winkelgeschwindigkeit über Geschwindigkeitstrajektorien auf den entsprechenden Materialflusselementen ermittelt:

$$\omega_{k+1} = {}^{\text{ME}}\tilde{\omega}_k(x_k).$$

Zuletzt wird dann die Position und Orientierung der Objekte im gekoppelten Materialflussmodell mittels numerischer Integration gelöst. Die Bewegungsdifferentialgleichungen des mathematischen Materialflussmodells werden im computerrechenbaren Simulationsmodell mit dem expliziten Euler-Verfahren (vgl. Gleichung (3.6)) berechnet:

$$x_{k+1} = x_k + h \cdot v_{k+1},$$

$$q_{k+1} = q_k + h/2 \cdot [\omega_{k+1}, 0] q_k.$$

Die Schritte während der Modellierungsphase des GMMs sind wie folgt:

1. Definition der 3D-Objektbeschreibung und Festlegen von physikalischen Eigenschaften (Vollautomatisch über CAD-Import)
2. Approximation von Geschwindigkeitsfeldern an Objektoberflächen
3. Definition der Stellgrößen der Aktor- und Messsysteme
4. Definition von Bereichen zum Ein- und Ausschleusen von Stückgütern
5. **Auswahl der kinetischen oder kinematischen Kollisionsauflösung.**

Die Modellierungsphase erfolgt in Analogie zum kinetischen Materialflussmodell. In einem letzten Schritt wird für alle Materialflusselemente entweder eine kinetische oder eine kinematische Kollisionsauflösung ausgewählt.

Abbildung 11 zeigt die während eines Simulationsschrittes benötigten Programmphasen. Es wird nun zwischen einer kinematischen und kinetischen Kollisionsauflösung unterschieden. Diese zusätzliche Unterscheidung führt zum geforderten GMM. Falls das Unterprogramm zur kinematischen Kollisionsauflösung also keine Iterationen enthält und die Kollisionserkennung realzeitdeterministisch gelöst werden kann, wurde erfolgreich ein GMM formuliert.

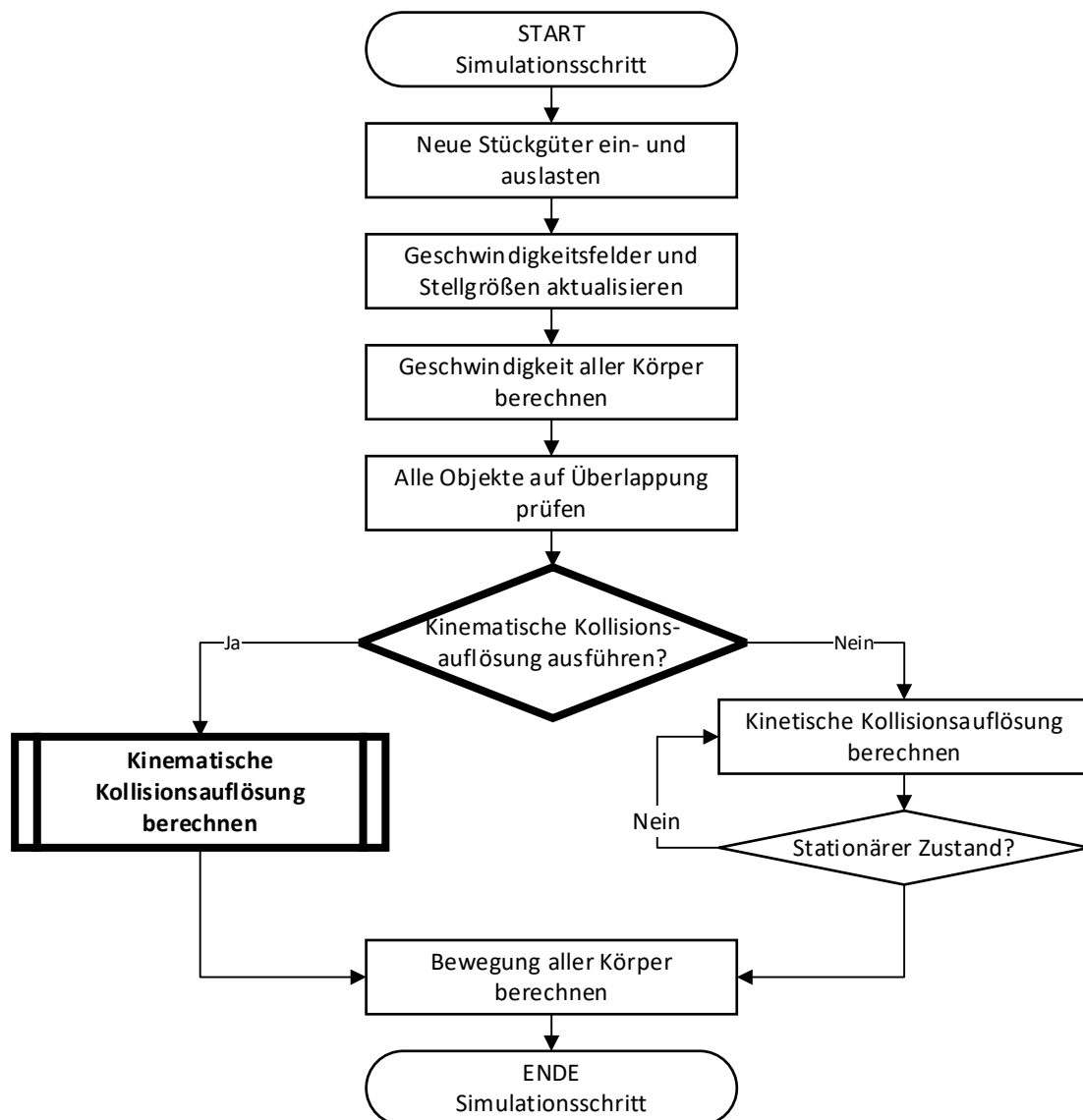


Abbildung 11: Programmablaufplan eines Simulationsschrittes im gekoppelten Materialflussmodell. Änderungen gegenüber dem kinetischen Materialflussmodell sind fettgedruckt.

5.3 Kinematische Kollisionsauflösung

In den folgenden Kapiteln wird die kinematische Kollisionsauflösung im gekoppelten Materialflussmodell erläutert. Für die jeweiligen Materialflusselemente werden kinematische Impulse hergeleitet, die den simulationstechnischen Anforderungen – insbesondere den realzeitdeterministischen Berechnungsanforderungen – entsprechen werden. Anhand von

exemplarischen Simulationsläufen wird die Rechenzeit gemessen und die Genauigkeit bewertet. Testplattform ist ein PC mit iCore7-Prozessor und Windows 7 Betriebssystem und der Echtzeiterweiterung TwinCAT 2.11 (siehe Kapitel 11.2).

5.3.1 Kollisionen und bleibende Kontakte

Bei der kinematischen Kollisionsauflösung werden anhand der Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Körpern in Richtung der Kollisionsnormalen $v_{\text{rel},n}$ zwei Fälle unterschieden:

1. $v_{\text{rel},n} < 0$

Zwei Objekte bewegen sich aufeinander zu. Die Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Objekten ist kleiner 0. Es handelt sich um eine **Kollision**, die zu einem **bleibenden Kontakt** aufgelöst wird.

2. $v_{\text{rel},n} \geq 0$

Zwei Objekte bewegen sich nicht aufeinander zu. Es handelt sich um **keine Kollision**. In diesem Fall sind keine Maßnahmen notwendig. Überlappungen lösen sich immer selbstständig auf.

Die Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Objekten in Richtung der Kollisionseinheitsnormalen $\mathbf{n}_{\text{nor}}^{\text{Kollision}}$ kann wie folgt berechnet werden:

$$v_{\text{rel},n} = \mathbf{n}_{\text{nor}}^{\text{Kollision}} \cdot \mathbf{v}_{\text{rel}}, \quad (6.3)$$

wobei $\mathbf{v}_{\text{rel}}$ der Relativgeschwindigkeitsvektor zwischen zwei Objekten ist.

5.3.2 Fördertechnik

Wie bereits in Kapitel 2.2 eingeführt, kann die Fördertechnik in bandgeführte und spurgeführte Fördertechnik unterteilt werden. Stückgut wird an den Förderern übergeben und auf der Fördertechnik gestapelt werden. Die dafür notwendigen kinematischen Kollisionsauflösungen werden für diese Anwendungsfälle nun nacheinander betrachtet.

5.3.2.1 Linearförderer mit ebener Lauffläche

Auf Linearförderern wird Stückgut entlang der geradlinigen waagrechten oder geneigten ebenen Lauffläche transportiert. Der Transport basiert bei angetriebenen Systemen auf der Reibkraft zwischen Band und Stückgut. Bei geneigten Systemen und nicht-angetriebenen Systemen wird die Bewegung durch Gravitation erzeugt. Linearförderer können auch während des Transportvorgangs translatorisch und rotatorisch um einen Gelenkpunkt bewegt werden, was beispielsweise bei Teleskopgurtförderern der Fall ist.

Bandgeführte Linearförderer nutzen Kunststoff- oder Stahlbänder als Lauffläche. Auch Rollen, Röllchen und Platten können diese ebene Fläche definieren, allerdings ausschließlich an diskreten Auflagepunkten.

Das Geschwindigkeitsfeld $^{LF,Band}v$ an der Objektoberfläche der Linearförderer wird als eine Fläche mit einer festen Flussrichtung approximiert (siehe Abbildung 12).

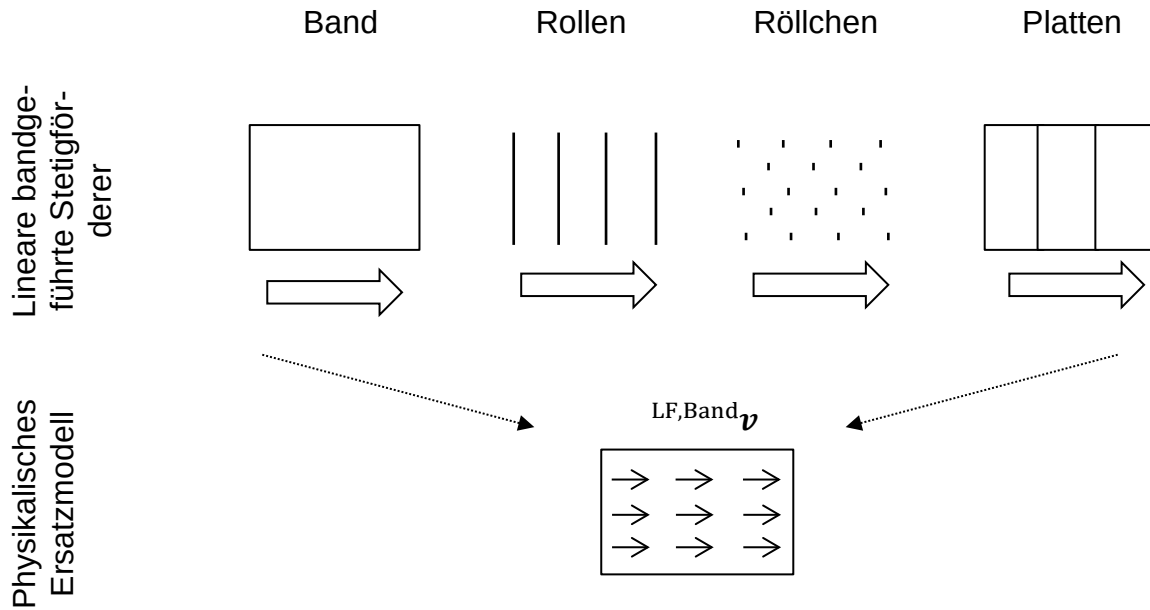


Abbildung 12: Approximation des Geschwindigkeitsfelds an der Objektoberfläche von linearen Stetigförderern mit ebener Lauffläche

Überlappt Stückgut aufgrund der Gravitation mit einem linearen bandgeführten Stetigförderer, wird die Durchdringung des Stückguts mit dem Förderer verhindert und das Stückgut aufgrund der auftretenden Reibung entlang der Laufrichtung beschleunigt bzw. abgebremst.

Kollision und bleibender Kontakt

Der Relativgeschwindigkeitsvektor zwischen Stückgut und Linearförderer bei einer Kollision ergibt sich zu

$${}^{SG,LF}\mathbf{v}_{rel} = {}^{SG}\mathbf{v}_{k+1} - ({}^{LF,Band}\mathbf{v} + {}^{LF}\mathbf{v} + {}^{LF}\boldsymbol{\omega} \times {}^{LF,KP}\mathbf{r}), \quad (6.4)$$

wobei ${}^{LF,KP}\mathbf{r}$ den Ortsvektor vom Gelenkpunkt des Linearförderers zum Kollisionspunkt beschreibt. Die Berechnung der Relativgeschwindigkeit in Richtung der Einheitsnormalen ${}^{SG,LF}\mathbf{v}_{rel,n}$ erfolgt nach Formel (6.3).

Im Falle einer Kollision ($v_{rel,n} \leq 0$) wird ein Kollisionsimpuls ${}^{LF,Band}\mathbf{p}_{Kollision}$ in Richtung der Einheitsnormale zur Lauffläche des Bandes $\mathbf{n}_{nor}$ berechnet:

$${}^{LF,Band}\mathbf{p}_{Kollision} = \mathbf{n}_{nor} \cdot {}^{SG,LF}\mathbf{v}_{rel,n}.$$

Dadurch wird verhindert, dass Stückgut den Bandförderer weiter durchdringt. Es entsteht ein bleibender Kontakt.

Das ermöglicht den Fall einer bleibenden Überlappung. Diese wiederum wird durch den Eindringungsimpuls aufgelöst:

$${}^{\text{LF,Band}}\mathbf{p}_{\text{Eindringung}} = h^{-1} \cdot \delta \cdot \mathbf{n}_{\text{nor}}, \quad (6.5)$$

wobei δ die Eindringtiefe ist.

Die Winkelgeschwindigkeitstrajektorie ${}^{\text{LF}}\tilde{\omega}_k$ wird mit 0 m/s definiert.

Reibung

Zusätzlich soll in der kinematischen Kollisionsauflösung auch in einfacher Weise Haft- und Gleitreibung berücksichtigt werden. Die Reibung wirkt entlang der tangentialen Relativgeschwindigkeit ${}^{\text{SG,LF}}\mathbf{v}_{\text{rel},t} = {}^{\text{SG,LF}}\mathbf{v}_{\text{rel}} - {}^{\text{SG,LF}}\mathbf{v}_{\text{rel},n}$. Unterschreitet die Relativgeschwindigkeit in Richtung der Einheitsnormalen die Haftreibungsgeschwindigkeitskonstante $v_{\text{Haftreibung}} \in \mathbb{R}^+$ tritt Haftreibung auf, ansonsten eine geschwindigkeitsproportionale Gleitreibung. Der Reibimpuls ergibt sich zu:

$${}^{\text{LF,Band}}\mathbf{p}_{\text{Reibung}} = \begin{cases} -\mathbf{v}_{\text{rel},t}, & |\mathbf{v}_{\text{rel},n}| > v_{\text{Haftreibung}} \\ -\mathbf{v}_{\text{rel},t} \cdot \mu, & \text{sonst,} \end{cases}$$

wobei $\mu \in [0,1]$ den Gleitreibungskoeffizienten beschreibt. Für $\mu = 0$ ist die Kollision reibungsfrei, für $\mu = 1$ herrscht immer Haftreibung.

Gesamtimpuls

Der Gesamtimpuls ${}^{\text{LF,Band}}\mathbf{p}$ für die Überlappung von Stückgut mit dem Band des Linearförderers ergibt sich zu:

$${}^{\text{LF,Band}}\mathbf{p} = {}^{\text{LF,Band}}\mathbf{p}_{\text{Kollision}} + {}^{\text{LF,Band}}\mathbf{p}_{\text{Eindringung}} + {}^{\text{LF,Band}}\mathbf{p}_{\text{Reibung}}. \quad (6.6)$$

Der in Gleichung (6.5) formulierte Eindringungsimpuls $\mathbf{p}_{\text{Eindringung}}$ ist eine Korrektur, um Überlappungen visuell exakt aufzulösen und muss nicht zwingend angewendet werden.

Simulationslauf

Zur Bewertung der ausreichenden Genauigkeit der zuvor genannten Modellgleichungen sollen im Folgenden zwei Simulationsläufe dienen. Es werden hierzu 5 quadratische Stückgüter hintereinander auf einem Linearförderer mit ebener Lauffläche eingelastet. Die ebene Lauffläche hat einen Gleitreibungskoeffizienten $\mu = 0.1$ und ist nicht angetrieben (s. Abbildung 13).

Im ersten Simulationslauf steht das Förderband senkrecht zur Gravitationskraft. Ein Kontaktpunktpaar ist als blau-rotes Kugelpaar eingezeichnet. In dem Simulationslauf werden die Kontaktpunkte von der Kollisionserkennung im vorderen linken Eckpunkt des Stückguts erkannt. Die Kontaktnormale steht senkrecht zur Lauffläche des Bandes. Wie erwartet bleibt das Stückgut fest auf dem Förderband liegen.

Im zweiten Simulationslauf ist das Förderband leicht geneigt. Deshalb rutscht das Stückgut entlang der Lauffläche nach unten, was erwartet wurde und ausreichend genau ist. Für beide Simulationsläufe dauert die Berechnung der numerischen Integration $5\ \mu\text{s}$ und die Berechnung der Impulse $4\ \mu\text{s}$.

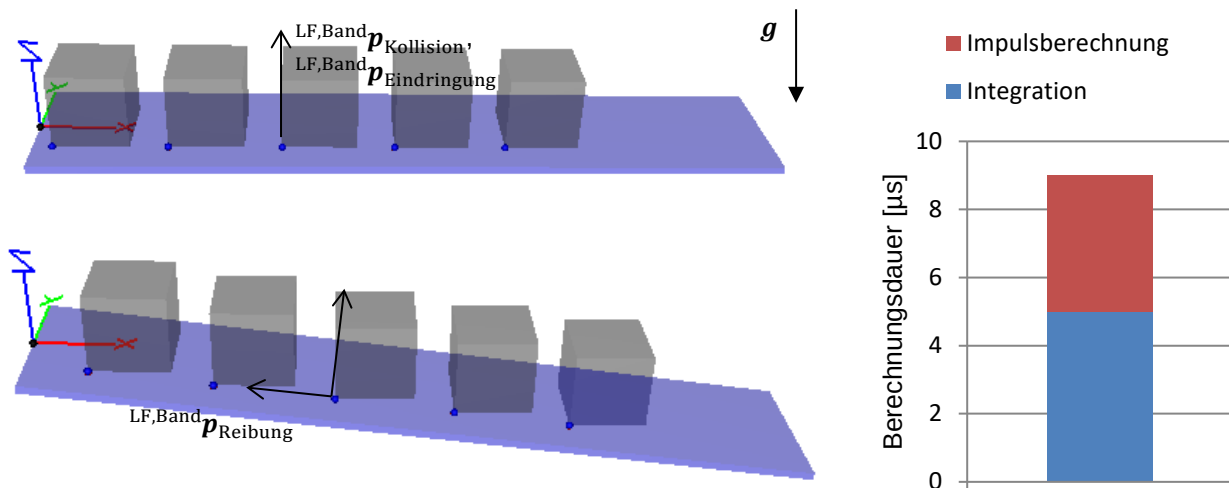


Abbildung 13: Simulationslauf mit einem Linearförderer mit ebener Lauffläche und 5 Stückgütern. Links unten ist der Linearförderer leicht geneigt und das Stückgut gleitet entlang des Bandes. Rechts ist die Berechnungsdauer dargestellt.

5.3.2.2 Übergang zwischen Förderern

Während des Übergangs zwischen Förderern wird auf beiden Förderern eine Kollision festgestellt. In der Realität würden zwei Reaktionsflächenkräfte durch die Kollision entstehen, deren Summe der Gewichtskraft des Stückguts entgegenwirkt.

Kinematische Kollisionsauflösung

Bei der kinematischen Kollisionsauflösung werden die Impulse von allen Förderern, die auf ein Stückgut wirken, zu einem Gesamtimpuls zusammengeführt. Für die Kollisionsimpulse und Eindringungsimpulse des Bandes wird das Maximum aus allen Eindringungsimpulsen für jede euklidische Raumachse $e = \{1,2,3\}$ berechnet. Dadurch kann das Stückgut zu keinem Zeitpunkt die Förderer weiter durchdringen. Für die Reibimpulse wird der arithmetische Mittelwert gebildet, was bei unterschiedlichen Bandgeschwindigkeiten zu einem gemittelten Transport des Stückguts führt:

$${}^{F,Band}p_{\text{Kollision/Eindringung}} = \max_{i,e}({}^{F,Band,i}p_{\text{Kollision/Eindringung},e}), \quad (6.7)$$

$${}^{F,Band}p_{\text{Reibung}} = \frac{\sum_i {}^{F,Band,i}p_{\text{Reibung}}}{I}. \quad (6.8)$$

Simulationslauf

Der beschriebene Lösungsansatz wird in einem Simulationslauf, wie in Abbildung 14 gezeigt, für einen Übergang zwischen zwei Linearförderern überprüft. Beide haben eine Geschwindigkeit von 1 m/s. Während des Übergangs werden wie erwartet zwei Kontaktpunkte berechnet. Die Kollisionsnormale steht jeweils senkrecht zur Laufläche. Durch die Zusammenführung der Impulse der Förderer zu einem Gesamtimpuls wird das Stückgut, wie erwartet, konstant mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s transportiert.

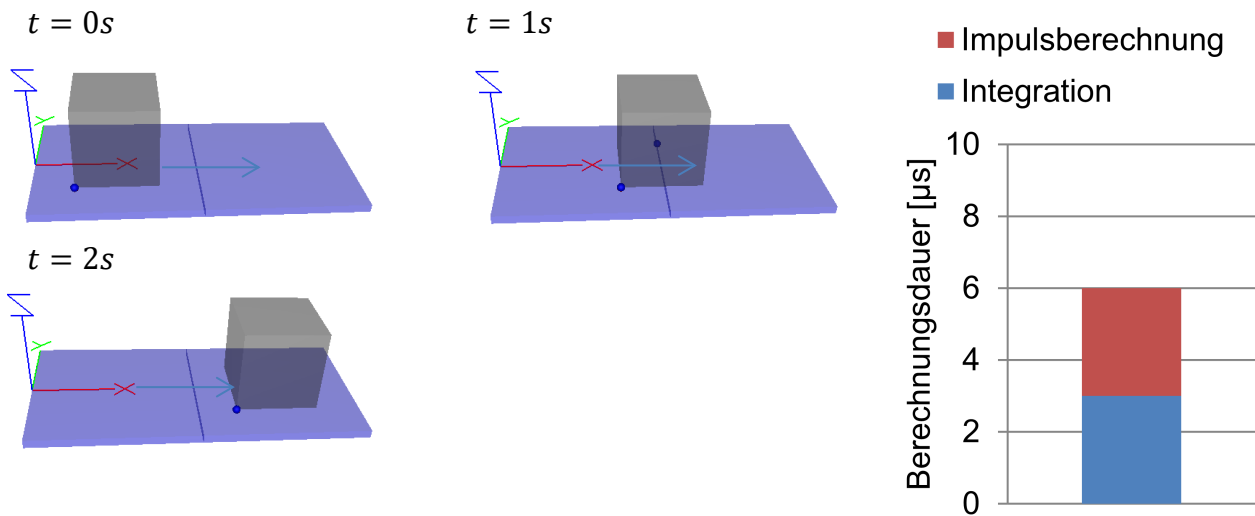


Abbildung 14: Simulationslauf mit Übergang zwischen zwei Linearförderern und einem Stückgut. Während des Übergangs werden zwei Kontaktpunkte erkannt. Rechts ist die Berechnungsdauer während des Übergangs dargestellt.

Beim Übergang zwischen zwei Förderern kann außerdem die ungünstige Situation entstehen, die aus der Kollisionserkennung resultiert: In dem Augenblick, in dem ein Stückgut das erste Mal mit dem zweiten Förderer in Kontakt tritt, ist die Kollisionsnormale nicht eindeutig. Deshalb kann es vorkommen, dass die Kollisionsnormale nicht, wie erwartet, senkrecht zur Lauflfläche zeigt, sondern entlang der Lauflfläche. Ist dies der Fall, gerät der Materialfluss beim Übergang ins Stocken.

Im hier gewählten Realisierungsansatz werden die Förderer nun in zwei geometrische Objekte – Gestell und Band – unterteilt: Das Gestell wird als geometrisches Objekt mit einer Bandgeschwindigkeit $^{LF,Band}v = 0\text{m/s}$ abgebildet und das Band als geometrisches Objekt mit einer sehr geringen Höhe und der gegebenen Bandgeschwindigkeit. Zwischen den beiden Objekten des Förderers wird keine Kollisionserkennung durchgeführt und auch keine kinematische Kollisionsauflösung berechnet.

Bei einer Kollision zwischen einem Stückgut und dem Band wird nun für die Kollisionsauflösung nicht mehr die von der Kollisionsauflösung berechnete Kollisionsnormale angewendet, sondern die Kollisionsnormale, die senkrecht zur Lauflfläche steht, fest vorgegeben.

In Abbildung 15 ist ein Simulationslauf mit dem um ein Gestell erweiterten Linearförderer dargestellt. Im ersten Experiment wird der zweite Linearförderer um die halbe Höhe des Bands erweitert, im zweiten Experiment um die doppelte Höhe. Wie erwartet, wird nun beim ersten Simulationslauf das Stückgut über die Kante transportiert und aufgrund des Eindringungsimpulses wieder an die Bandoberfläche zurückgesetzt. Im zweiten Simulationslauf staut sich das Stückgut vor dem zweiten Band auf, da der Gesamtimpuls des Gestells entlang der Laufrichtung des Bandes wirkt.

Da nun 3 Impulse berechnet werden müssen, erhöht sich die Berechnungsdauer um knapp $2\ \mu\text{s}$ für die Impulse auf $5\ \mu\text{s}$ (vgl. Abbildung 14 und Abbildung 15).

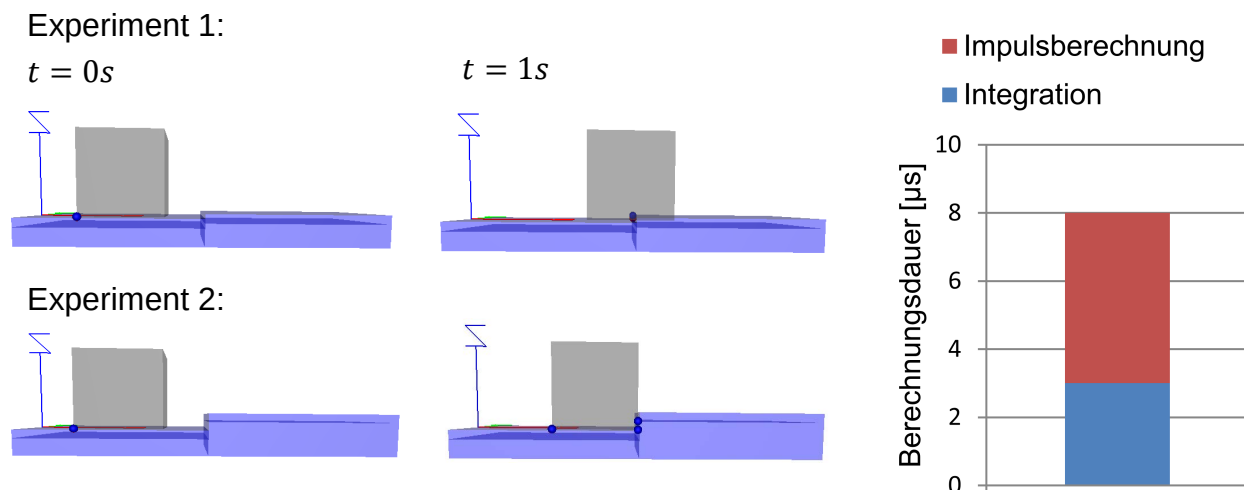


Abbildung 15: Zwei Simulationsläufe mit Übergang zwischen zwei Linearförderern und einem Stückgut. Im ersten Simulationslauf ist der zweite Förderer um eine halbe Bandhöhe nach oben geschoben, im zweiten Simulationslauf um die doppelte Bandhöhe. Rechts ist die Berechnungsdauer beim Aufstauen während Experiment 2 dargestellt.

5.3.2.3 Stapeln von Stückgut auf einem Förderer

Beim Transport von Stückgütern auf einem Förderer kann es vorkommen, dass auch gestapeltes Stückgut bewegt werden soll. Das ist beispielsweise der Fall, wenn Stückgut in einer Kiste transportiert wird oder palettiertes Stückgut bewegt wird.

Hier treten zwischen den Stückgütern Abhängigkeiten auf, die gemeinsam gelöst werden müssen. Diese Abhängigkeiten werden durch einen Kontaktgraphen beschrieben und mittels Schockfortpflanzung aufgelöst (siehe Abbildung 16). Dieses Vorgehen wird auch in Bender beschrieben. (Bender 2007)

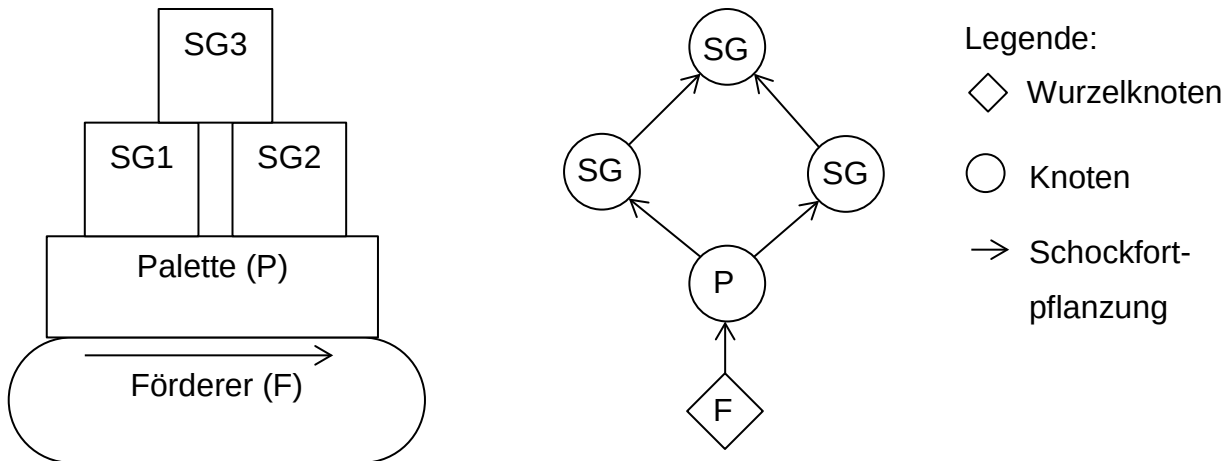


Abbildung 16: Kommissioniertes Stückgut (SG) auf einem Förderer (links) und der dazugehörige Kontaktgraph (rechts)

Kinematische Kollisionsauflösung

Ausgehend vom Wurzelknoten, der immer ein Materialflusselement ist, wird nun auf das nächste anliegende Stückgut im Kontaktgraph der Gesamtimpuls $\mathbf{p}_k$ nach Gleichung (6.6) angewendet. Dann wird überprüft, ob in Richtung des Gesamtimpulses weiteres Stückgut im Kontaktgraphen angeschlossen ist. Ist dies der Fall, wird wiederum der Gesamtimpuls nach Gleichung (6.6) auf das anliegende Stückgut angewendet. Da nur auf das anliegende Stückgut – nicht aber auf das Stückgut im aktuellen Knoten – der weitere Impuls angewendet wird, handelt es sich um eine Schockfortpflanzung.

Der Kollisionsimpuls für die anliegenden Stückgüter wird nicht mit der Relativgeschwindigkeit $\mathbf{v}_{\text{rel}}$ zwischen Förderband und anliegendem Stückgut berechnet, sondern aus der Relativgeschwindigkeit zwischen der Geschwindigkeit des Stückguts im aktuellen Knoten und des Stückguts im anliegenden Knoten:

$$\mathbf{v}_{\text{rel}} = \mathbf{v}_{\text{SG,aktueller Knoten}} - \mathbf{v}_{\text{SG,anliegender Knoten}}$$

Durch die Stückgutanordnung in Abbildung 16 würde auf Stückgut 3 der Gesamtimpuls zweimal Anwendung finden. Wie beim Übergang zwischen Förderern müsste der Impuls aus der Schockfortpflanzung gemittelt werden. Der Einfachheit halber wird für jedes anliegende Stückgut allerdings nur überprüft, ob bereits ein Impuls durch Schockfortpflanzung wirkt. Ist dies der Fall, wird kein weiterer Impuls mehr angewendet.

Simulationslauf

Zur Überprüfung des Lösungsansatzes soll – wie in Abbildung 17 gezeigt – ein Simulationslauf mit zu einer Pyramide gestapeltem Stückgut erfolgen. Der Linearförderer wird mit einer Bandgeschwindigkeit von 1 m/s betrieben. Wie erwartet, wird durch die Schockfortpflanzung Stückgut entlang der Lauffläche transportiert. Für die Schockfortpflanzung wird ein zusätzlicher Zeitbedarf von 5 μ s notwendig, wobei sich eine gesamte Berechnungsdauer von 20 μ s ergibt.

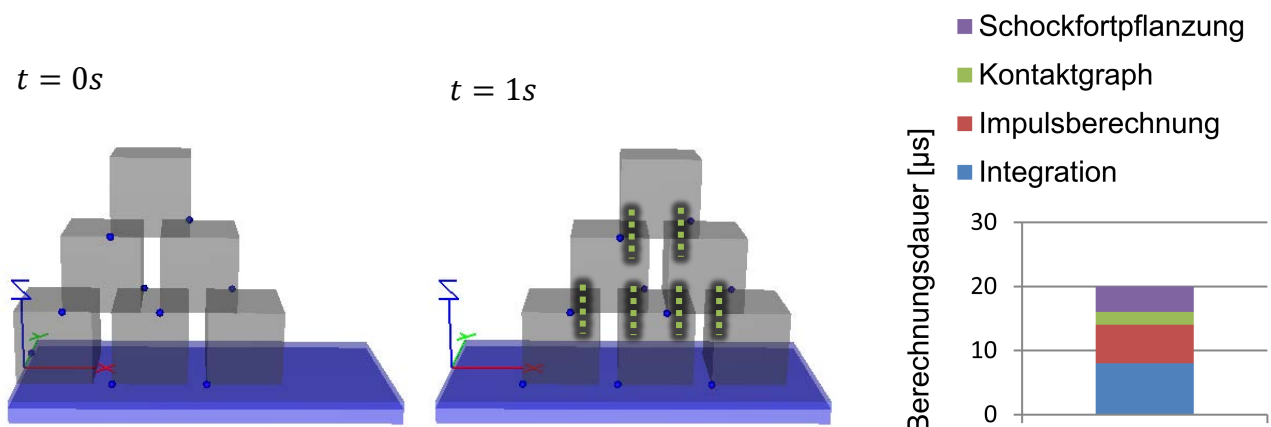


Abbildung 17: Simulationslauf mit gestapeltem Stückgut. Der Kontaktgraph ist bei $t = 1s$ grün interpoliert. Rechts ist die Berechnungsdauer dargestellt.

5.3.3 Handhabung

Handhabungssysteme dienen der gezielten Beeinflussung von Stückgütern im Materialflusssystem (vgl. Kapitel 2.2). Heute gängige Handhabungssysteme sind Roboter mit kinematischen Greifsystemen und Sperren. Die kinematische Kollisionsauflösung beider Systeme wird im Folgenden diskutiert.

5.3.3.1 Roboter

Roboter sind ein gängiges Handhabungsinstrument zum Ein- und Ausschleusen von Stückgütern. Durch den Roboter wird das Stückgut unter Berücksichtigung der Orientierung im Raum bewegt. Der Roboter verbindet mehrere Achsen miteinander, die ausgehend vom Wurzelkörper seriell miteinander verkettet sind. Durch Aktorsysteme, welche im Gelenkpunkt der Achsen befestigt sind, können einzelne Körper translatorisch und rotatorisch bewegt werden. Die aktuelle Position und Orientierung jeder Achse in Abhängigkeit von seiner Vorgängerachse in der seriellen Kette kann eindeutig beschrieben werden durch die aktuelle Rotationsmatrix, den Gelenkpunktvektor vom Masseschwerpunkt zum Gelenkpunkt und den Ortsvektor zum Massenschwerpunkt (vgl. Abbildung 18).

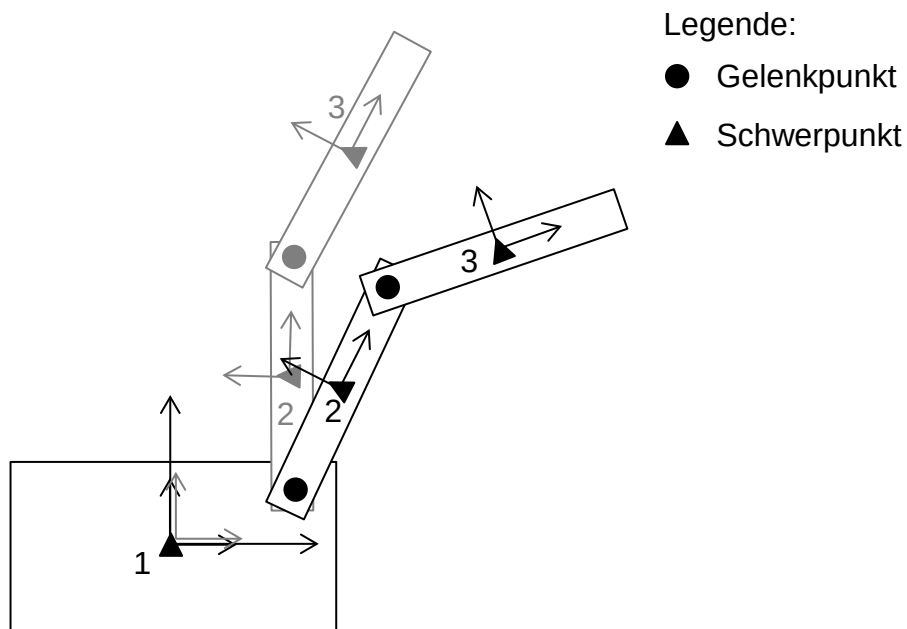


Abbildung 18: Skizze des Simulationsprinzips eines Roboters

Durch die gesteuerten Hilfsenergien der Aktorsysteme in den Gelenkpunkten des Roboters wird eine Sollgeschwindigkeit in translatorische oder rotatorische Richtung vorgegeben (vgl. Kapitel 2.5). Mithilfe des Kreuzproduktes kann daraus die lineare und radiale Geschwindigkeit im Schwerpunkt des jeweiligen Körpers berechnet werden (vgl. Gleichung (6.4)) und dann mittels Integration nach Gleichung (6.1) und (6.2) der Ortsvektor und die Rotationsmatrix ermittelt werden. Über ein vorgeschaltetes Dynamikglied (PT1, ...) kann die Sollgeschwindigkeit näherungsweise geglättet werden.

Kinematische Kollisionsauflösung

Zu Beginn des Simulationsschrittes werden die Geschwindigkeitsvorgaben in den Gelenkpunkten während der Phase „Stellgrößen aktualisieren“ gesetzt. Kommt es nun während der Kollisionsauflösung zu einer Kollision des Roboters mit seiner Umgebung, werden die Sollgeschwindigkeiten in den Körpern der vorgeschalteten seriellen Kette auf 0 gesetzt. Der Roboter wird sich vom Kollisionspunkt abwärts in diesem Simulationsschritt nicht bewegen. Außerdem kann eine entsprechende Rückmeldung an das Aktorsystem erfolgen.

Einzigste Ausnahme ist der Kontakt bzw. eine Kollision mit einem Stückgut. Hier wird mit Hilfe des Kontaktgraphen zusätzlich überprüft, ob das Stückgut in der Bewegungsrichtung des Roboters mit seiner Umgebung in Kontakt steht. Ist dies nicht der Fall, wird auf das Stückgut mit der Relativgeschwindigkeit im Kollisionspunkt ein Gesamtimpuls nach Gleichung (6.6) angewendet und dadurch verschoben. Außerdem wird eine Schockfortpflanzung angewendet, falls sich Stückgut an der Achse aufstaut. Ansonsten wird der Roboter ebenfalls gestoppt, um ein Durchdringen des Stückguts mit anderen Materialflusselementen zu verhindern.

Simulationslauf

In Abbildung 19 ist der Simulationslauf mit einem Stückgut zwischen zwei Robotern dargestellt. Die Gelenkpunkte der Roboter sind als schwarze Kugeln markiert und die Kollisionspunkte als blaue bzw. rote Kugeln. Der linke Roboter wird mit 1 m/s entlang der Laufrichtung des Bandes bewegt, das Band selbst ist nicht angetrieben. Zunächst wird das Stückgut nach dem Kontakt mit dem Roboter entlang des Bandes verschoben. Die Simulation zeigt, dass nach Eintritt der Verklemmung des Stückguts zwischen den beiden Robotern der linke Roboter trotz einer Geschwindigkeitsvorgabe des Aktorsystems nicht mehr in Laufrichtung des

Bandes verschoben wird. Dieses Verhalten entspricht auch weitestgehend der Realität, insbesondere wenn die Aktorsysteme der Roboter gleich ausgelegt sind. Die Berechnungsdauer für die kinematische Kollisionsauflösung während des Simulationslaufs übersteigt 15 μs nicht.

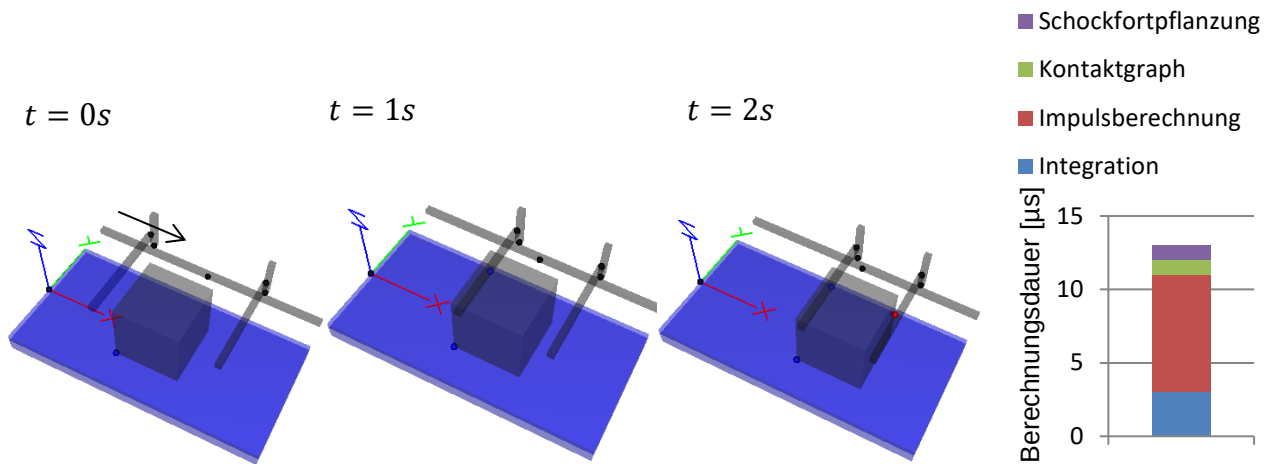


Abbildung 19: Simulationslauf mit einem Stückgut zwischen zwei Robotern. Der linke Roboter wird entlang der Laufrichtung des Bandes verschoben und kommt aufgrund der Klemmsituation trotz Geschwindigkeitsvorgabe zum Stillstand. Rechts ist die Berechnungsdauer während des Verklemmens ($t = 2\text{ s}$) dargestellt.

5.3.3.2 Sperren

Ein gebräuchliches Handhabungselement in der Materialflusssystemtechnik sind Sperren. Werden diese rechtwinklig zur Laufrichtung des Förderers angebracht, kann ein Aufstauen von Stückgut auf dem Förderer erreicht werden. Abgeschrägte Banden dienen oft zum Ausschleusen von Stückgut durch Entlanggleiten des Stückguts an der Sperre. Bewegte Sperren ermöglichen weiterhin ein gezieltes Ein- oder Ausschleusen von Stückgütern (siehe Abbildung 20).

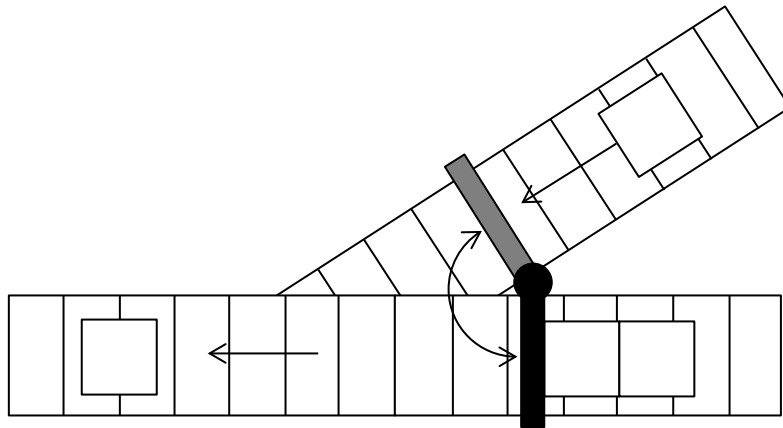


Abbildung 20: Einschleusen von Stückgut mit Hilfe von Sperren (nach VDI-Richtlinie 2346)

Kinematische Kollisionsauflösung

Im hier gewählten Ansatz wird die kinematische Kollisionsauflösung für Sperren wie eine einzelne Roboterachse gehandhabt. Es gelten somit die in Kapitel 5.3.3.1 gezeigten Formeln.

Simulationslauf

Zur Überprüfung des Modellansatzes ist in Abbildung 21 ein Simulationslauf mit einer Sperre dargestellt. Dafür wurde der Simulationslauf mit dem gestapelten Stückgut aus Abbildung 17 um einen zweiten Linearförderer erweitert, der rechtwinklig zum ersten Förderer angebracht ist. Durch eine schräg angebrachte Sperre wird durch das angetriebene Förderband Stückgut vom ersten Förderer auf den zweiten Förderer umgeladen. Durch die Reibung zwischen dem pyramidenförmig angeordneten Stückgut verschiebt sich dieses durch den Umsetzvorgang geringfügig.

Wird die Sperre durch ein Aktorsystem bewegt, kann das gestapelte Stückgut auch zurückgedrängt oder seitlich verschoben werden.

Die Berechnungsdauer des Simulationslaufs ist ähnlich zu dem Simulationslauf mit gestapeltem Stückgut in Abbildung 17 und liegt im Bereich von 20 μ s.

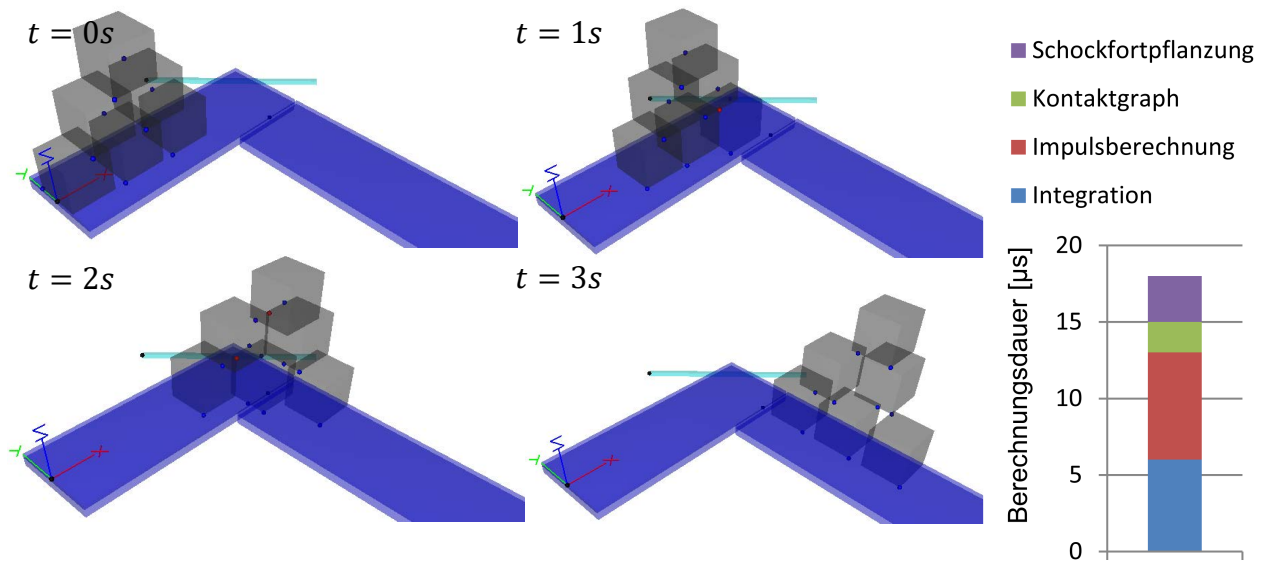


Abbildung 21: Simulationslauf mit gestapeltem Stückgut, zwei Linearförderern und einer Sperre (cyan). Rechts ist die Berechnungsdauer zum Zeitpunkt $t = 2s$ dargestellt.

5.3.3.3 Kinematische Greifsysteme

Die gezielte Bewegung des Stückguts im Raum wird durch Greifsysteme vorgenommen, die an dem Werkzeugmittelpunkt am Roboter geführt werden. Bei kinematischen Greifsystemen wird Stückgut über zwei Arme eingeklemmt und dann bewegt (siehe Abbildung 22).

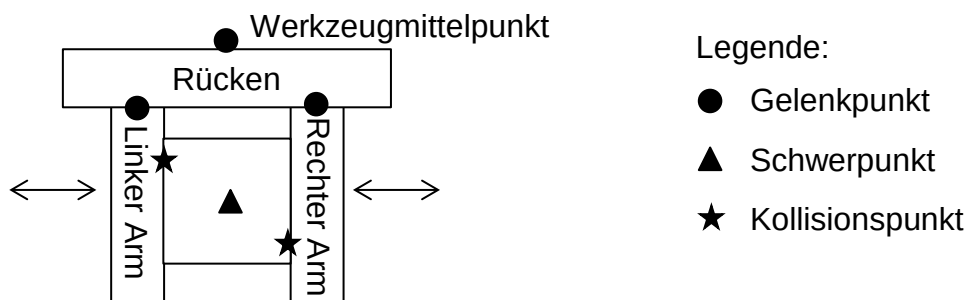


Abbildung 22: Gezielte Bewegung von Stückgut mit einem kinematischen Greifsystem

Kinematische Kollisionsauflösung

Bei einem Kontakt oder einer Kollision eines Stückgutes mit einem der Arme des Roboters wird mit Hilfe des Kontaktgraphen überprüft, ob das Stückgut in Richtung der Relativgeschwindigkeit einen Kontakt mit dem anderen Arm des Roboters bildet. In diesem Fall wird das Stückgut als weiterer starrer Gelenkpunkt des Roboters betrachtet und dadurch die gewünschte definierte Bewegung im Raum erzeugt. Diese Idee wurde bereits in (Reinhart et al. 2010b) für Materialflusssimulationen vorgestellt und findet hier ebenfalls Anwendung.

Simulationslauf

In Abbildung 23 ist ein Simulationslauf mit einem kinematischen Greifer, der an einem Roboter befestigt ist, dargestellt. Die Gelenkpunkte sind als schwarze Kugeln markiert und die Kollisionspunkte als blau-rotes Kugelpaar. In dem Szenario wird von einem Förderband Stückgut gegriffen, dann wird der Roboter gewendet und das Stückgut auf dem anderen Linearförderer abgelegt. Wie erwartet, hat der Simulationslauf eine ausreichende Genauigkeit.

Für das Simulationsszenario wurde für die kinematische Kollisionsauflösung eine maximale Berechnungsdauer von 12 μ s gemessen.

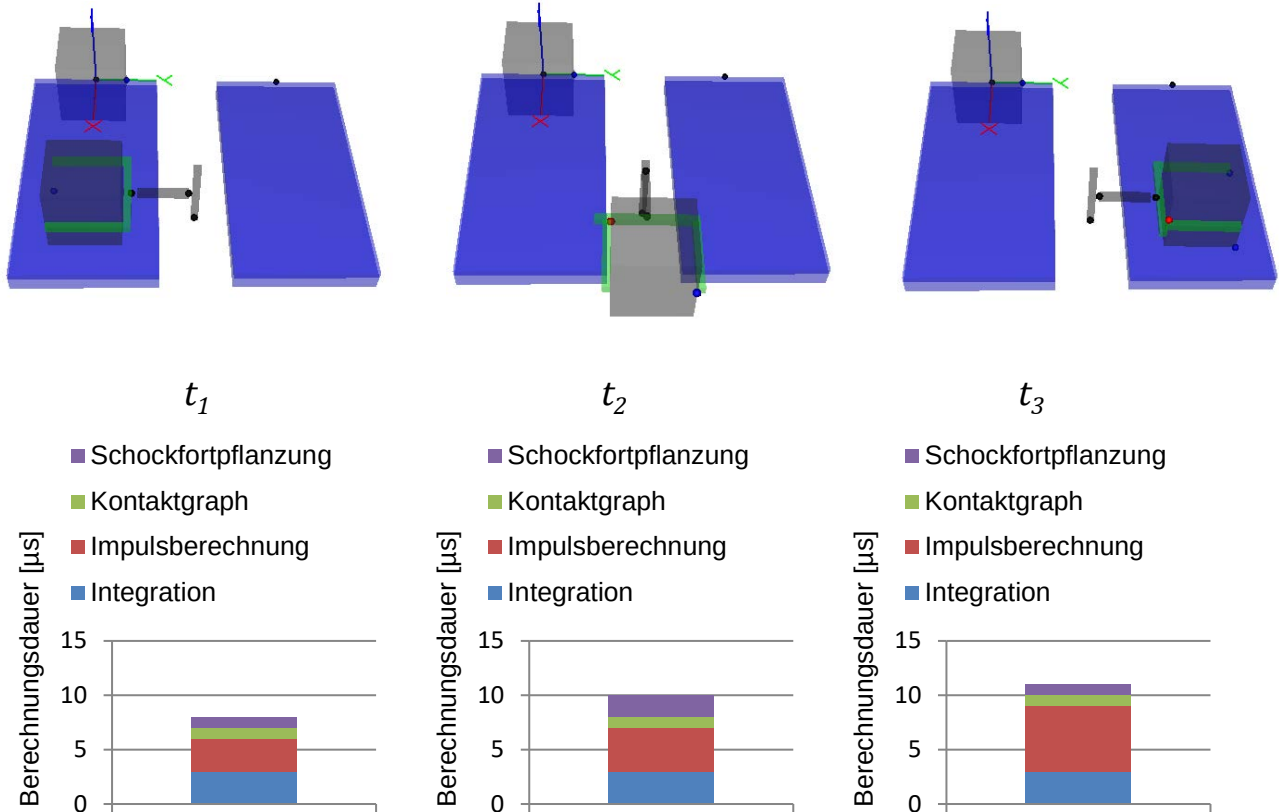


Abbildung 23: Simulationslauf mit einem kinematischen Greifsystem. Unten ist die Berechnungsdauer zu den drei Zeitpunkten t_1 , t_2 und t_3 dargestellt.

5.3.4 Lagertechnik

Die Lagertechnik dient zum Zwischenlagern oder Puffern von Stückgütern im Materialflusssystem (vgl. Kapitel 2.2).

Kinematische Kollisionsauflösung

Die kinematische Kollisionsauflösung der Lagertechnik erfolgt analog zu einem Förderer mit ebener Lauffläche. Wird für ein Stückgut ein bleibender Kontakt mit der Lagertechnik oder einem im Lager befindlichen Stückgut festgestellt, wird die Impulsberechnung und Integration nicht mehr ausgeführt. Dadurch kann später im computerrechenbaren Simulationsmodell Rechenzeit gespart werden. Jede Kollision mit einem anderen Materialflusselement (z. B. Greifer) aktiviert die Impulsberechnung und Integration sofort wieder. Dies ist ebenfalls der Fall, wenn das Lager bewegt wird.

Simulationslauf

In Abbildung 24 ist ein Simulationslauf mit einer Lagerzeile mit fünf Lagerplätzen dargestellt. Jeder Lagerplatz ist mit zwei Stückgütern in Blocklagerung bestückt. Sobald sich Stückgut in dem Lager befindet, wird es für die kinematische Kollisionsauflösung und numerische Integration deaktiviert. Trotzdem beträgt die Berechnungsdauer noch $2\text{ }\mu\text{s}$ für die Abfrage bei allen Stückgütern, ob eine numerische Integration stattfinden soll.

Sobald Stückgut beispielsweise mit einem kinematischen Greifer in Kontakt gekommen ist, wird es deaktiviert. Das zeigt auch der Farbwechsel von rot nach grau für das Stückgut bei der Simulationszeit 10 s an (vgl. Abbildung 24, Mitte).

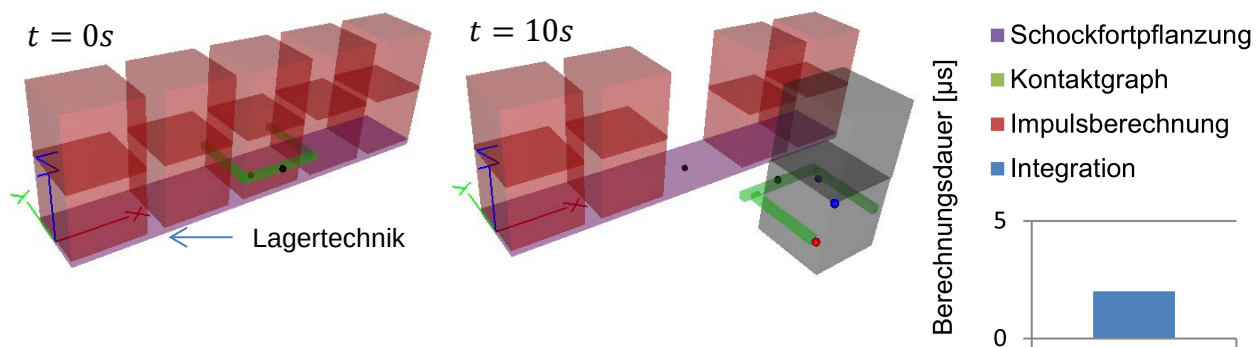


Abbildung 24: Simulationslauf mit einer Lagerzeile und jeweils zwei Stückgütern in Blocklagerung. Die für eine kinematische Kollisionsauflösung deaktivierten Stückgüter sind rot dargestellt. Rechts ist die Berechnungsdauer während des Lagervorgangs dargestellt.

5.3.5 Ungebundene Stückgüter

In dem Materialflussmodell kann es (beispielsweise nach dem Einlasten durch den freien Fall aber auch nach Kollisionssituationen) dazu kommen, dass sich Stückgut ohne eine Überlappung mit einem Materialflusselement bewegt. In diesem Fall wird die vorläufige Geschwindigkeit auf eine Maximalgeschwindigkeit $v^{\text{Max}} \in \mathbb{R}^+$ begrenzt. Dieser Schritt ist notwendig, damit sich Stückgut beim erstmaligen Kontakt mit einem Materialflusselement nur minimal überlappt:

$$\mathbf{v}_{k+1} = \begin{cases} \mathbf{v}_{k+1}, & |\mathbf{v}_{k+1}| \leq v^{\text{Max}} \\ \frac{\mathbf{v}_{k+1}}{|\mathbf{v}_{k+1}|} v^{\text{Max}}, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Treten zwei ungebundene Stückgüter miteinander in Kontakt, wird zunächst der Gesamtimpuls gemäß Gleichung (6.6) berechnet. Der Impuls wird dann jeweils zur Hälfte in entgegengesetzter Richtung auf die beiden Stückgüter angewendet. Ist eines der Stückgüter durch ein Materialflusselement in Richtung des Impulses gebunden, wirkt der Impuls vollständig auf das ungebundene Stückgut. Sind beide Stückgüter gebunden, wird kein Impuls berechnet.

5.3.6 Messsysteme & Identifikationssysteme

Messsysteme dienen zum Erkennen von Stückgut im Materialflusssystem (vgl. Kapitel 2.4).

Der Sensorbereich der Messsysteme wird durch eine geometrische 3D-Objektbeschreibung modelliert. Überlappt Stückgut mit einem Sensorbereich kann eine entsprechende Rückmeldung an das Sensorelement erfolgen. Da während der Kollisionsauflösung ein Zugriff auf die geometrische Objektbeschreibung von Stückgut und Sensorbereich möglich ist, können sowohl Merkmale als auch Daten vom Stückgut im Sensorbereich gelesen und geschrieben werden.

Anhand der Position und Orientierung des Sensorelements und des Stückguts kann auch das Verhalten von Barcode-Scannern abgebildet werden. Bei Barcode-Scannern wird anhand der Orientierungen und Positionen überprüft, ob dieser das Stückgut erkennen kann und nur dann eine entsprechende Rückmeldung an den Sensor gegeben.

Da in diesem Fall keine kinematische Kollisionsauflösung notwendig ist und die Sensorauswertung auf einfachen logischen Bedingungen beruht, wurde an dieser Stelle auf eine Darstellung und grafische Bewertung des Simulationslaufs verzichtet. Die Berechnungsdauer ist so gering, dass diese nicht eindeutig messbar war.

5.3.7 Priorisierung der kinematischen Kollisionsauflösung

Um eine gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Impulse zu verhindern, wird die Impulsberechnung in einer definierten Reihenfolge ausgeführt.

Zunächst werden alle Kontakte durch die Kollisionserkennung berechnet. Danach wird einmalig der Kontaktgraph für den aktuellen Simulationsschritt bestimmt. Die kinematische Kollisionsauflösung mit Schockfortpflanzung für die Lagertechnik, Fördertechnik, Handhabung ohne Greifer werden nacheinander durchgeführt.

Die kinematische Kollisionsauflösung für Greifer wird danach gesondert ausgeführt. Das liegt daran, dass nur bildlich ein Gelenk zwischen Greifer und Stückgut eingefügt wird. Tatsächlich wird die entsprechende Geschwindigkeit auf die Basis des Stückguts geschrieben und später bei der Integration des Stückguts gelöst. Dieser Schritt ist vor allem wegen der geforderten Realzeit notwendig, da sonst iterative Algorithmen für die Gelenkberechnung genutzt werden müssten.

Zuletzt wird das Verhalten der Messsysteme berechnet.

5.4 Analyse des Laufzeit- und Speicherplatzbedarfs

Anhand der empirisch gewonnen Messwerte wird pauschal der Laufzeitbedarf der kinematischen Kollisionserkennung abgeschätzt.

Die Messungen zeigen, dass für die Impulsberechnung je nach Kontaktsituation zwischen 1 μ s bis 5 μ s benötigt werden. Die numerische Integration erfordert pro Stückgut oder Materialflusselement je 1 μ s. Die Berechnung des Kontaktgraphen kostet kaum Rechenzeit und kann auf 0.2 μ s gerundet werden. Die Schockfortpflanzung fällt pro Kontaktpunkt mit maximal 1 μ s ins Gewicht. Für Stückgüter, die sich im Lager befinden, fällt bis auf die numerische Integration von 1 μ s keine Berechnungsdauer an.

Wenn jedes Stückgut in der Regel nur einen Kontakt mit einem Materialflusselement ausbildet und Stückgüter untereinander im Schnitt nur einen Kontakt ausbilden, dann kann der Laufzeitbedarf $OP_{\text{kinem. Kollisionsaufl.}}$ für die Anzahl an bewegtem Stückgut und der Materialflusselemente $N_{\text{Stückgüter \& MF-Elemente}}$ in erster Näherung geschätzt werden zu

$$OP_{\text{kinem. Kollisionsaufl.}} \approx N_{\text{Stückgüter \& MF-Elemente}} \cdot c_{\text{kinem. Kollisionsaufl.}}$$

mit

$$c_{\text{kinem. Kollisionsaufl.}} \approx 5 - 10 \mu\text{s}.$$

Der Speicherplatzbedarf $MEM_{\text{kinem. Kollisionsaufl.}}$ für die kinematische Kollisionsauflösung wurde ebenfalls mit dem Testsystem gemessen:

$$MEM_{\text{kinem. Kollisionsaufl.}} \approx N_{\text{Stückgüter \& MF-Elemente}} \cdot m_{\text{kinem. Kollisionsaufl.}}$$

mit

$$m_{\text{kinem. Kollisionsaufl.}} = 0.5 \text{ KB.}$$

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das gekoppelte Materialflussmodell hergeleitet. Die Kopplung wurde gemäß der Anforderungsanalyse mittels einer integrativ gekoppelten Modellbasis erreicht. Um der Durchgängigkeit gerecht zu werden, sind für das kinematische Teilmodell im GMM realzeitdeterministische Berechnungseigenschaften notwendig. Ausgehend von diesen Betrachtungen wurde eine gemeinsame mathematische Modellbasis für ein kinematisches und kinetisches Materialflussmodell mit einer impulsbasierten Kollisionsauflösung hergeleitet. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass in keinem der beiden Modelle Transitionsbedingungen notwendig sind.

Für die Berechnung der Impulse kann im GMM zwischen einer kinematischen Kollisionsauflösung und kinetischen Kollisionsauflösung gewählt werden. Die impulsbasierte kinetische Kollisionsauflösung erfolgt dabei nach dem Stand der Technik. Für die kinematische Kollisionsauflösung wurden Vereinfachungen formuliert und entsprechende kinematische Impulse abgeleitet. Anhand verschiedener Szenarien für Fördertechnik, Lagertechnik und Handhabung wurden die Berechnungseigenschaften evaluiert. Daraus konnte gefolgert werden, dass die kinematischen Impulse ausreichend genau für die Entwicklungsunterstützung von Materialflusssteuerungen sind, wobei die realzeitdeterministischen Berechnungseigenschaften eingehalten werden.

Damit steht für die Entwicklungsunterstützung von Materialflusssteuerungen erstmals ein gekoppeltes Materialflussmodell zur Verfügung, mit dem bedarfsgerecht kinetische und kinematische Simulationsläufe durchgeführt werden können, ohne eine Neumodellierung durchführen zu müssen.

Kapitel 6

Realzeitdeterministische Kollisionserkennung

In Kapitel 5 wurde ein GMM vorgestellt dessen computerrechenbare Umsetzung realzeitdeterministische Eigenschaften aufweist. Dabei wurden die Kenntnis der richtigen Kontaktinformationen und deren realzeitdeterministische Berechnung vorausgesetzt. In diesem Kapitel wird die zuvor nur verbal beschriebene Kollisionserkennung konkretisiert.

Es werden bekannte und eigene Verfahren vorgestellt, vorhandene Realisierungen bewertet und eventuell notwendige Erweiterungen diskutiert. Alle Lösungsansätze der Kollisionserkennung werden mit den im vorherigen Kapitel beschriebenen Anforderungen abgeglichen. Merkmale sind der richtige Kollisionspunkt, eine Kollisionsnormale senkrecht zu der jeweiligen Kontaktfläche und die Berechnung der Kollisionstiefe. Ergänzend werden Strategien zur Komplexitätsreduzierung beschrieben, um realzeitdeterministische Berechnungseigenschaften erzielen zu können.

6.1 Realzeitdeterministische Kollisionsprüfung

6.1.1 Unterscheidungsmerkmale der geometrischen Kollisionsprüfung

In den letzten 25 Jahren wurden zahlreiche unterschiedliche Verfahren zur Kollisionsprüfung entwickelt, die möglicherweise angewendet werden können. Zwei wesentliche Bewertungskriterien sind für die gegebene Aufgabe ausschlaggebend:

- Die Richtigkeit der Kollisionsinformationen und
- die Erfüllung der benötigten Berechnungseigenschaften.

Nach Lin und Gottschalk (Lin et al. 1998), Jiménez et al. (Jiménez et al. 2001) und Ericson (Ericson 2005) kann mittels des Funktionsumfangs der Kollisionsprüfung eine erste **Vorauswahl** für die Bewertung getroffen werden. Die Kriterien sind

- die mögliche geometrische Objektbeschreibung,

- die berechneten Kollisionsinformationen und
- die Verfahren zur Kollisionsprüfung.

Im Folgenden wird der Funktionsumfang der Kollisionsprüfung hierzu kurz skizziert. Dabei werden nur Eigenschaften beschrieben, die in konkretem Zusammenhang mit dem hier beschriebenen GMM stehen. Auf die Beschreibung weiterer Eigenschaften soll hier verzichtet werden.

6.1.1.1 Geometrische Objektbeschreibung

Die Objektbeschreibung der Stückgüter und der Materialflusselemente kann in verschiedenen **Detaillierungsstufen** erfolgen. Angefangen bei primitiven Objekten (beispielsweise Kugel, Quader, Zylinder, ...), über konvexe und zusammengesetzt-konvexe Objekte reicht die Spannweite der Detaillierung hin bis zu nichtkonvexen Objekten und Polygonsuppen. Bei Polygonsuppen handelt es sich um eine Menge von Polygonzügen, die kein definiertes Volumen einschließen. Diese können wie zusammengesetzt-konvexe Objekte und nichtkonvexe Objekte durch entsprechende Verfahren in konvexe Unterobjekte überführt werden (siehe Abbildung 25). (Lin et al. 1998)

Dadurch wird allerdings die Anzahl der Kollisionsobjekte erhöht, was zu einem höheren Laufzeitbedarf führt. (Reinhart et al. 2010a) zeigt, dass eine Kollisionsprüfung mit mehreren konvexen Objekten gegenüber einer Kollisionsprüfung mit einem nichtkonvexen Objekt einen deutlich geringeren Laufzeitbedarf hat.

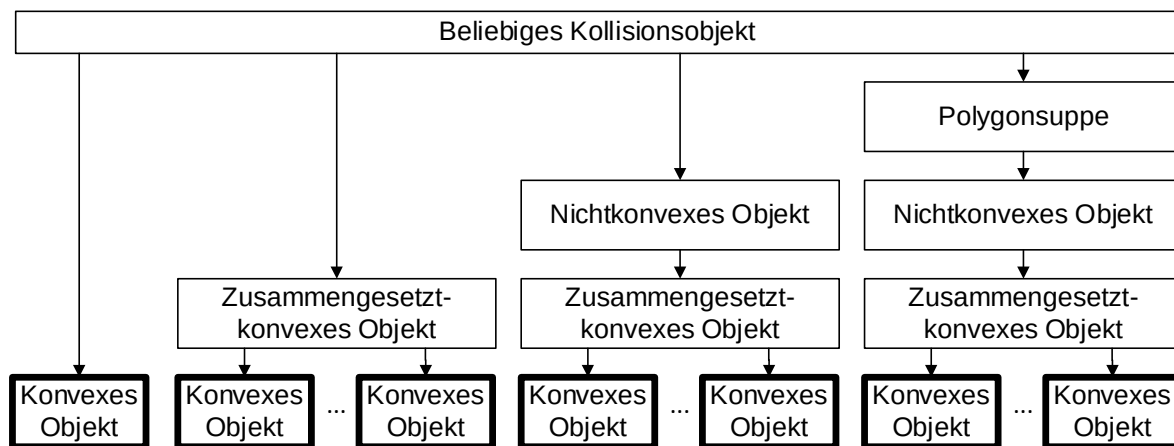


Abbildung 25: Zerlegung eines beliebigen Kollisionsobjektes in konvexe (Unter-)Objekte

Nichtpolygonale Objektbeschreibungen wie beispielsweise die Constructive Solid Geometry oder implizite und parametrisierbare Oberflächen liefern eine exakte Objektbeschreibung. Die Kollisionserkennung für nichtpolygonale Objektmodelle ist sehr laufzeitintensiv und eignet sich dadurch grundsätzlich nur für statische, einmalige Objektanordnungen. (Lin et al. 1998) Ausnahmen bilden Kollisionsprüfungen für spezielle Objektpaarungen wie „Quader-gegen-Quader“.

Bei einer **polygonalen Objektbeschreibung** werden die Objekte mittels Punkten, Kanten und Flächen approximiert. Polygonale Objektbeschreibungen werden insbesondere aufgrund der guten Laufzeiteigenschaften bei der echtzeitfähigen Kollisionserkennung eingesetzt. (Ericson 2005)

Neben der polygonalen und nichtpolygonalen Objektbeschreibung wird zwischen einer **starr** und **deformierbaren Objektbeschreibung** unterschieden. (Lin et al. 1998) Starre Körper ändern ihre Objektoberfläche zur Laufzeit nicht, während sich bei deformierbaren Objekten das Volumen, das solche Objekte einschließen, ändern kann. Durch die Deformation kann es auch zum Selbstkontakt der Körper kommen. Durch die Anpassung der Geometriebeschreibung ist die Kollisionsprüfung mit deformierbaren Objekten laufzeitintensiver. Bei einer Detaillierung der Objektbeschreibung kann es weiterhin zu dynamischen Speicherallokationen kommen. Das widerspricht den simulationstechnischen Anforderungen an ein GMM.

6.1.1.2 Kollisionsinformationen

Die Kollisionsinformationen beinhalten die von der Kollisionsprüfung ermittelten Daten. Im Falle eines Kontaktes zwischen zwei Objekten werden Kontaktinformationen berechnet, im Falle einer Lücke zwischen zwei Objekten Abstandsinformationen.

Im einfachsten Fall wird in den **Kontaktinformationen** lediglich eine Überlappung festgestellt, also ermittelt, ob zwei Objekte kollidieren. Es existieren auch Bibliotheken, die tiefergehende Kontaktinformationen wie den Kontaktpunkt, die Kontaktnormale, die Eindringtiefe oder gar das Eindringvolumen berechnen. (Lin et al. 1998)

Die Abstandsinformationen reichen, ähnlich wie die Kontaktinformationen, von der euklidischen Distanz bis hin zu den nächstgelegenen Punkten auf den jeweiligen Objektoberflächen und der dazugehörigen Abstandsnormalen. (Lin et al. 1998)

6.1.1.3 Verfahren zur Kollisionsprüfung

Die Verfahren zur Kollisionsprüfung bestimmen die benötigten Kollisionsinformationen und basieren meist auf drei grundlegenden Annahmen:

- Zeitliche Kohärenz,
- Interpenetration und
- Extrusion

Bei **zeitlicher Kohärenz** wird vorausgesetzt, dass sich Objekte innerhalb eines Zeitschrittes nur geringfügig bewegen. Dadurch kann die Laufzeit der Kollisionsprüfung verringert werden, da auf gespeicherte Daten aus dem vorangegangenen Schritt zurückgegriffen wird. (Lin et al. 1998)

Die Annahme einer **Interpenetration** verbessert zusätzlich die Zeitkomplexität der Kollisionsprüfung. Interpenetration bedeutet, dass eine Kontaktprüfung erst grob durchgeführt wird und dann schrittweise verfeinert solange Rechenzeit zur Verfügung steht.

Weiterhin kann der Fall auftreten, dass eine Kollision nur zwischen zwei Zeitschritten auftritt, aber nicht zu den Berechnungszeitpunkten. Durch **Extrusion** wird dieser Kontakt ebenfalls erkannt. Diese Verfahren sind allerdings laufzeitintensiver. (Ericson 2005)

6.1.2 Anforderungen an eine Bibliothek zur Kollisionsprüfung

Der Steuerungstakt bei gängigen Materialflusssteuerungen beträgt heute 1ms bis 100 ms. Die Kollisionserkennung für alle Objektpaarungen pro Simulationsschritt soll also im Bereich von wenigen Millisekunden liegen. Aufgrund der hohen Laufzeitanforderungen kann die Kollisionsprüfung in der gegebenen Umgebung des Simulationssystems deshalb nur mit **polygonalen Objektbeschreibungen** arbeiten. Es wird von einer ausschließlich **konvexen Objektbeschreibung** ausgegangen. Beliebige Objektbeschreibungen erhöhen den Laufzeitbedarf unnötig und sind daher in einem vorgelagerten Schritt in konvexe Objektbeschreibungen zu zerlegen. Alle anderen Objektbeschreibungen werden aufgrund ihrer hohen Berechnungsdauer ausgeschlossen.

Abstandsinformationen werden für die vorgestellte Materialflusssimulation nicht benötigt. **Die Kontaktinformationen** müssen die Information beinhalten, ob eine Kollision aufgetreten ist. Weiterhin wird die **Normale im Kollisionspunkt** benötigt. Wünschenswert ist auch die Berechnung der Eindringtiefe um den Eindringungsimpuls berechnen zu können (vgl. Kapitel 5.3).

Aufgrund der kleinen Simulationsschritte kann eine **zeitliche Kohärenz** angenommen werden. Eine Extrusion und Interpenetration für das GMM ist überflüssig und wird aufgrund der erwarteten höheren Laufzeit ausgeschlossen.

Es wird vorausgesetzt, dass sich Stückgüter während des Transportprozesses nicht verformen. Eine **starre Objektbeschreibung** ist daher für die Materialflusssimulation vollkommen ausreichend und wegen der geforderten niedrigen Laufzeit zudem sinnvoll.

Da die Kollisionserkennungsbibliothek in dem durchgängigen Materialflussmodell genutzt werden soll, muss diese **realzeitdeterministische Berechnungseigenschaften** aufweisen.

6.1.3 Auswahl möglicher Bibliotheken zur Kollisionsprüfung

Die Algorithmen für die Kollisionsprüfung von polygonalen und konvexen Objektbeschreibungen reichen von

- der quadratischen Programmierung,
- dem **Gilbert-Johnson-Keerthi-Algorithmus** (GJK),

- dem **Expanding-Polytope-Algorithmus** (EPA),
- dem **Supporting-Map-Algorithmus** (SMA) bis hin zum
- **Closest-Feature-Algorithmus** (CFA). (Ericson 2005)

Die Bibliothek **VCLIP** (Mirtich 1997) implementiert einen modifizierten CFA, die Bibliotheken **SOLID** 3.5.6 (Van den Bergen 2003) und **BULLET** 2.82 (Coumans 2014) jeweils eine Kombination aus GJKA für die Abstandsinformationen und EPA bzw. SMA für die Kontaktinformationen. Für die Kollisionsprüfung von Quadern gegen Quader ist in BULLET ein spezielles Verfahren auf Basis einer impliziten Objektbeschreibung implementiert. (Bender 2007)

BULLET ist eine Physik-Software, die vor allem bei Computerspielen Anwendung findet. Da die Kollisionserkennung aber von der Spielephysik klar abgekoppelt werden kann, wurde diese Bibliothek ebenfalls berücksichtigt. Weiterhin implementiert BULLET zwei unterschiedliche polygonale Kollisionsprüfungen und ein spezielles Verfahren für die Kollisionsprüfung von Quadern gegen Quader, die jeweils getrennt bewertet werden:

- BULLET EPA

Diese Variante implementiert den GJKA für die Abstandsinformationen und EPA für die Kontaktinformationen.

- BULLET SMA

Diese Variante implementiert den GJKA für die Abstandsinformationen und SMA für die Kontaktinformationen.

- BULLET BOX

Diese Variante implementiert ein implizites Verfahren für die Kollisionsprüfung von Quadern gegen Quader. Kollisionsprüfungen mit anderen konvexen Objektbeschreibungen können nicht durchgeführt werden.

Sowohl VCLIP als auch SOLID machen weitreichend Gebrauch der Anwendungsbibliotheken „**Standard Template Library**“. Bis auf die Varianten von BULLET nutzen alle Kollisionsprüfungen die Anwendungsbibliothek „QHULL“ zur Berechnung und Sicherstellung des konvexen umhüllenden Volumens (vgl. Abbildung 25). Wie in Kapitel 3.2.1.4 beschrieben wurde,

sind in Echtzeitbetriebssystemen bzw. Echtbetriebssystemerweiterungen häufig keine echtzeitfähigen Varianten dieser Implementierungen verfügbar, so auch in der eingesetzten Echtzeitbetriebssystemerweiterung TwinCAT 2.11. Um trotzdem alle Kollisionsprüfungen für die Bewertungen heranziehen zu können wurde für diese Arbeit die Implementierung der „Standard Template Library“ von SGI in der Version 3.3 (HP 1994) und die Bibliothek QHULL in der Version 1.0 (Qhull 2014) auf TwinCAT 2.11 portiert.

6.1.4 Bewertung der Kollisionsprüfung

Für die Bewertung der Laufzeiteigenschaften werden verschiedene Experimente durchgeführt. Das Ziel ist eine detaillierte Analyse der ausreichenden Genauigkeit, der Robustheit, des Realzeitdeterminismus und der Echtzeitspeicherverwaltung.

6.1.4.1 Experimente

In Experiment 1 werden zwei Würfel mit einer Kantenlänge von 1 m initialisiert. Einer der Würfel wird sprungartig nacheinander so bewegt, dass jeweils alle sechs Kombinationen aus Punkten, Kanten und Flächen getestet werden (siehe Abbildung 26). Diese Sequenz wird dreimal hintereinander ausgeführt und zwar so, dass zwischen den Würfeln eine definierte Distanz ist, sich diese exakt berühren und dann durchdringen. Daraus ergeben sich 18 verschiedenen Kombinationen. Die Kollisionsprüfung wird alle 10 ms wiederholt, wobei eine neue Positionierung nur jede Sekunde stattfindet.

In Variation 1 wird derselbe Testlauf durchgeführt, allerdings werden die Kantenlängen und die Positionen der Würfel um den Faktor 10 skaliert, bei Variation 2 um den Faktor 0.1. Bei Variation 3 wird die Kantenlänge einer Achse bei einem der Würfel verdoppelt.

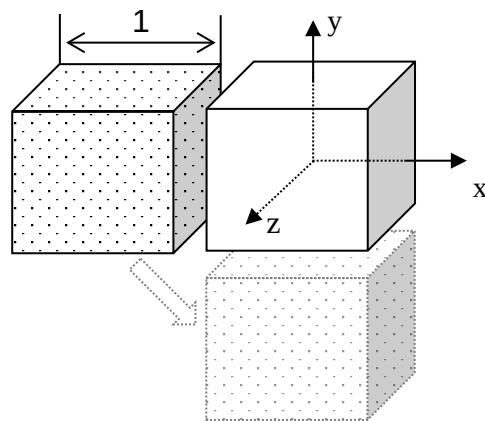


Abbildung 26: Skizze des Prinzips von Experiment 1 zur Bewertung der Eigenschaften der Bibliotheken zur Kollisionsprüfung

In Experiment 2 werden zwei Zylinder nebeneinander positioniert und um ihre eigene Achse rotiert (vgl. Abbildung 27). Während des Tests rotieren die Zylinder innerhalb von 2π Sekunden einmal um die y-Achse und durchdringen sich dabei geringfügig. Der Testlauf dauert ebenfalls 18 s und wird alle 10 ms wiederholt.

Bei Variationen von Experiment 2 wird die Diskretisierung der Zylinder um den Faktor 10 und Faktor 100 detailliert, d. h. die Anzahl an Punkten, Kanten und Flächen der polygonalen Objektbeschreibung wird vergrößert.

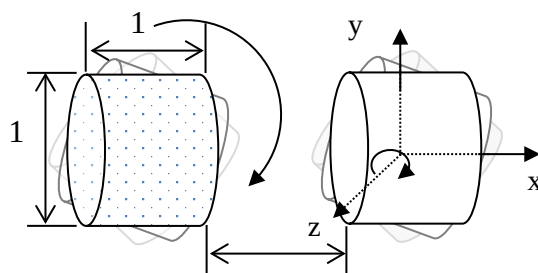


Abbildung 27: Skizze des Prinzips der Experimente 2 und 3 zur Bewertung der Eigenschaften der Bibliotheken zur Kollisionsprüfung

6.1.4.2 Ausreichende Genauigkeit

Bewertungskriterium

Die **ausreichende Genauigkeit** der berechneten Kontaktinformationen ist dann gegeben, wenn die berechnete **Normale** in den Kontaktinformationen **senkrecht auf der Kante** bzw. **Fläche** der polygonalen Objektbeschreibungen stehen. Nur bei der Kombination Punkt-Punkt wird eine Normale in Richtung des einen Punktes zum anderen erwartet. Grundsätzlich müssten andere Ergebnisse nicht als falsch gewertet werden, für die Berechnung der vorgeschlagenen Kollisionsauflösung im Materialflussmodell sind andere Lösungen aber nicht ausreichend. Zuletzt wird der Einfluss der Objektskalierung auf die Genauigkeit bei der Berechnung der Kontaktinformationen untersucht.

Auswertung der berechneten Kontaktinformationen

Zunächst werden die berechneten Kontaktinformationen ausgewertet und im Anschluss der Einfluss der Objektskalierung analysiert. Abbildung 28 zeigt die berechnete Normale von VCLIP bei Experiment 1 während der Kombination Kante-Fläche. Wider Erwarten berechnet der Algorithmus die Normale nicht senkrecht zur Fläche des blauen Objektes, sondern zeigt entlang der Fläche. Dieser Effekt trat auch während der Kombination Fläche-Fläche auf. Damit ist VCLIP für das GMM definitiv ungeeignet.

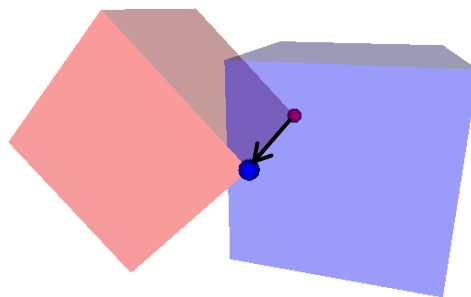


Abbildung 28: Falsch berechnete Normale mit der Bibliothek VCLIP bei Experiment 1 während der Kombination Kante-Fläche. Die Normale ist der Ortsvektor vom roten zum blauen Punkt und zeigt entlang der Fläche des blauen Objektes. Sie steht nicht, wie erwartet, senkrecht darauf.

Die Bibliothek SOLID berechnete während der Experimente die Normalen wie erwartet. Allerdings zeigt sich bei der Variation 3 (doppelte Kantenlänge bei einem der Würfel) eine

Abnormität. Bei der Kombination Punkt-Fläche wird eine Kollision gemeldet, sobald sich die Objekte berühren und die in Abbildung 29 dargestellte Normale berechnet.

Die Normale zeigt dabei nicht, wie erwartet, vom blauen zum roten Objekt, sondern in die entgegengesetzte Richtung. Die Differenz zwischen den Kontaktpunkten ergibt eine deutliche Eindringtiefe, obwohl nur eine Berührung vorliegt.

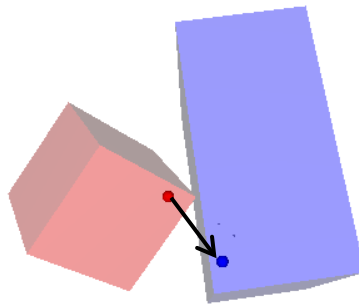


Abbildung 29: Falsch berechnete Normale mit der Bibliothek SOLID bei Experiment 1 während der Kombination Punkt-Fläche. Der blaue Körper wurde zu einem Quader mit doppelter Achslänge in y- und z-Richtung erweitert.

Das Materialflussmodell würde nun bei sich voneinander entfernenden Objekten eine Kollision erkennen; bei sich aufeinander zubewegenden Objekten keine Kollision. Dadurch ergeben sich unausweichlich Fehler beim Simulationslauf mit dem Materialflussmodell.

Dieser Fehler in SOLID ist reproduzierbar und tritt in Situationen auf, in dem sich die Objekte gerade berühren. Weitergehende Versuche mit abweichenden Einstellungen in SOLID führten zu keiner Veränderung.

Die Bibliotheken BULLET EPA, BULLET SMA und BULLET BOX berechneten die Normale und die Eindringtiefe wie erwartet. Allerdings kommt es bei der Bibliothek BULLET SMA zu kleineren Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Kollisionspunkte. Die ausreichende Genauigkeit bei einem Simulationslauf mit dem Materialflussmodell ist weiterhin gegeben (vgl. Abbildung 30).

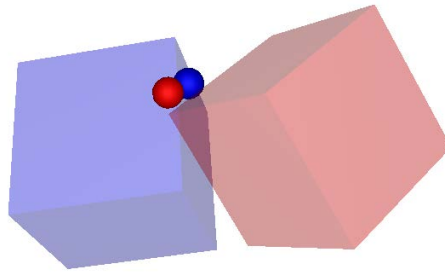


Abbildung 30: Bei der Bestimmung der Kontaktpunkte kommt es teilweise zu kleineren Ungenauigkeiten mit der Bibliothek BULLET SMA, die allerdings immer noch im Toleranzbereich der ausreichenden Genauigkeit liegen.

Auswertung des Einflusses der Objektskalierung

In Variation 1 von Experiment 1 werden nun die Objektskalierungen in Experiment 1 um den Faktor 10 vergrößert. Alle Simulationsläufe konnten problemlos durchgeführt werden. Einzig in der Bibliothek BULLET SMA zeigte sich die Auffälligkeit, dass bei einer vergrößerten Objektskalierung die Kontaktinformationen genauer bestimmt wurden (s. Abbildung 31, vgl. Abbildung 30).

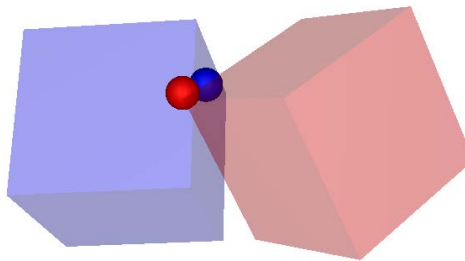


Abbildung 31: Bei einer Vergrößerung der Objektskalierung um den Faktor 10 in der Bibliothek BULLET SMA werden die Kontaktpunkte deutlich genauer berechnet.

In Variation 2 von Experiment 1 wird die Objektskalierung um den Faktor 10 verringert. Bei den Simulationsläufen kam es mit allen Bibliotheken zu Problemen bei der Berechnung der Kontaktinformationen. Einzige Ausnahme ist BULLET BOX, die weiterhin die erwarteten Kontaktinformationen liefert.

Die Bibliothek SOLID berechnete die Kontaktpunkte ungenau, während die Bibliotheken VCLIP, BULLET EPA und BULLET SMA einige der Kontaktsituationen nicht registrierten und keinen Kontakt zurückmeldeten.

Bei Experiment 2 wurden alle Kontaktinformationen wie erwartet berechnet.

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann also für alle Bibliotheken festgehalten werden, dass die Spannweite (Breite/Höhe/Tiefe) der geometrischen Kollisionserkennungsobjekte mindestens 1 oder größer sein sollte. Bei der Initialisierung des GMMs sollte deshalb zuerst die Spannweite aller relevanten Objekte ermittelt werden und dann alle Objekte mit einem Skalierungsfaktor auf eine Spannweite von mindestens 1 skaliert werden.

Tabelle 6 fasst die Ergebnisse der Analyse zur ausreichenden Genauigkeit zusammen. Die Instabilität bei der Bibliothek SOLID und die falsch berechneten Kontaktinformationen bei der Bibliothek VCLIP führen zum zwangsläufigen Ausschluss dieser Bibliotheken für den Einsatz im GMM.

Tabelle 6: Bewertung der ausreichenden Genauigkeit für ausgewählte Bibliotheken zur Kollisionsprüfung

Eigenschaft	BUL- LET BOX	BUL- LET EPA	BUL- LET SMA	SOLID	VCLIP
Ausreichende Genauigkeit	+	+	+	—*)	—*)
Mindestspannweite der Objekte	1)	> 1	> 1	> 1	> 1

*) Führt zum Ausschluss der Bibliothek für den Einsatz im GMM.

1) Eine Skalierung der Objekte hat keine Auswirkung auf die Berechnung der Kontaktinformationen

+: Erwartungen erfüllt; o: Erwartungen ausreichend erfüllt; —: Erwartungen nicht erfüllt

6.1.4.3 Robustheit

Bewertungskriterium

Durch die Parametrierung und Positionierung der Würfel in Experiment 1 wird sichergestellt, dass alle möglichen Kombinationen der polygonalen Objektbeschreibungen von der Kollisionsprüfung einmal getestet werden müssen. Durch Experiment 2 kann außerdem der Einfluss der Objektdiskretisierung bewertet werden. Die Bibliothek gilt als robust, wenn sich der Simulationslauf bei den Experimenten nicht beendet oder eine Endlosschleife entsteht.

Auswertung

Keine der Bibliotheken meldete einen Fehler bei den Simulationsläufen mit Experiment 1. Beim Simulationslauf mit Experiment 2 und der Variation einer sehr detaillierten Objektbeschreibung beendete SOLID die Echtzeitbetriebssystemerweiterung unvorhergesehen.

Zusammenfassung

Sowohl BULLET als auch VCLIP können deshalb als robust angesehen werden. SOLID ist dagegen in der Echtzeiterweiterung nicht robust. Im Windows-Betriebssystem ließen sich alle Experimente mit SOLID problemlos ausführen. Ohne Codeanpassungen für die Echtzeitbetriebssystemerweiterung ist die Robustheit nicht gegeben.

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Robustheitsanalyse zusammengefasst.

Tabelle 7: Bewertung der Robustheit für ausgewählte Bibliotheken zur Kollisionsprüfung

Eigenschaft	BULLET BOX	BULLET EPA	BULLET SMA	SOLID	VCLIP
Robustheit	+	+	+	— ^{*)}	+

^{*)} Ohne Codeanpassungen für die Echtzeitbetriebssystemerweiterung ist die Robustheit nicht gegeben.

+: Erwartungen erfüllt; o: Erwartungen ausreichend erfüllt; —: Erwartungen nicht erfüllt

6.1.4.4 Speichermanagement

Bewertungskriterium

Ein Realzeitspeichermanagement ist gegeben, wenn pro Objektbeschreibung nur wenige Kilobyte (KB) Speicher allokiert werden. Außerdem sollte der Speicher nur linear mit einer detaillierten Objektdiskretisierung steigen. Außerdem darf während des Simulationslaufs zu keinem Zeitpunkt dynamischer Speicher allokiert werden.

Auswertung

In Tabelle 8 ist der Speicherbedarf für die einzelnen Experimente dargestellt. Alle Bibliotheken verwalten den benötigten Speicher während der Initialisierungsphase sehr effizient im Bereich von wenigen Kilobyte. Mit steigender Objektdiskretisierung nimmt auch der Speicherbedarf bei allen Bibliotheken annähernd linear zu.

Zusammenfassung

BULLET und SOLID benötigen zur Laufzeit keinen dynamischen Speicher und erfüllen deshalb die Anforderungen an das Realzeit-Speichermanagement. VCLIP ist allem Anschein nach auch so ausgelegt, möglichst keinen Speicher zur Laufzeit anzulegen. Nur in Sonder-situationen, wenn sich z. B. zwei Flächen gegenüber lagen, wurden Speicherallokationen im Bereich von wenigen Kilobyte notwendig.

Tabelle 8: Bewertung des Speicherbedarfs für ausgewählte Bibliotheken zur Kollisionsprüfung

Eigenschaft	BULLET BOX	BULLET EPA	BULLET SMA	SOLID	VCLIP
Speicherbedarf Würfel [KB]	1	5	5	3	6
Speicherbedarf Zylinder [KB]	²⁾	9	9	35	47
Speicherbedarf Zylinder (V1) ³⁾ [KB]	²⁾	66	66	453	478
Speicherbedarf Zylinder (V2) ⁴⁾ [KB]	²⁾	524	524	¹⁾	4722
Speicherbedarf Interface [KB]	3	1	1	0	12
Dynamischer Laufzeitspeicher [KB]	0	0	0	0	48 ^{*)}
Realzeit-Speichermanagement	+	+	+	0	— ^{*)}

^{*)} Führt zum Ausschluss der Bibliothek für den Einsatz im GMM.

1) Messung nicht möglich, da die Initialisierung die Echtzeitbetriebssystemerweiterung beendet.

2) Messung nicht möglich, da nur eine Kollisionsprüfung „Quader-gegen-Quader“ möglich ist.

3) Objektdiskretisierung um den Faktor 10 verfeinert

4) Objektdiskretisierung um den Faktor 100 verfeinert

+: Erwartungen erfüllt; o: Erwartungen ausreichend erfüllt; —: Erwartungen nicht erfüllt

6.1.4.5 Berechnungsdauer und Zeitdeterminismus

Die vorangegangenen Analysen haben bereits gezeigt, dass die Bibliotheken SOLID und VCLIP die Anforderungen für das beschriebene Materialflussmodell nicht erfüllen. Diese Bibliotheken werden deshalb bei den Analysen zur Berechnungsdauer und dem Zeitdeterminismus nicht weiter betrachtet.

Bewertungskriterium

Bei einem Simulationslauf sollen mehrere 100 Stückgüter bei einer Simulationsschrittweite von 10 ms simuliert werden. Deshalb sollte die Kollisionsprüfung eine niedrige Berechnungsdauer, idealerweise unter 10 μ s aufweisen. Weiterhin sollte die Berechnungsdauer während der Experimente eine obere Schranke nicht überschreiten, so dass der Determinismus gegeben ist.

Auswertung

Abbildung 32 beschreibt die Berechnungsdauer der Kollisionsprüfung pro Simulationsschritt über der Simulationszeit bei Experiment 1. Sobald sich das Objektpaar überlappt, ist bei BULLET EPA und BULLET SMA ein deutlicher Rechenanstieg zu verzeichnen. Davor verhält sich die Berechnungsdauer der beiden Bibliotheken recht ähnlich. Dieser Effekt kann dadurch erklärt werden, dass zunächst immer der GJK-Ausführung durchgeführt wird. Nur falls dieser nicht erfolgreich ist wird eine Berechnung mit dem EPA bzw. dem SMA durchgeführt.

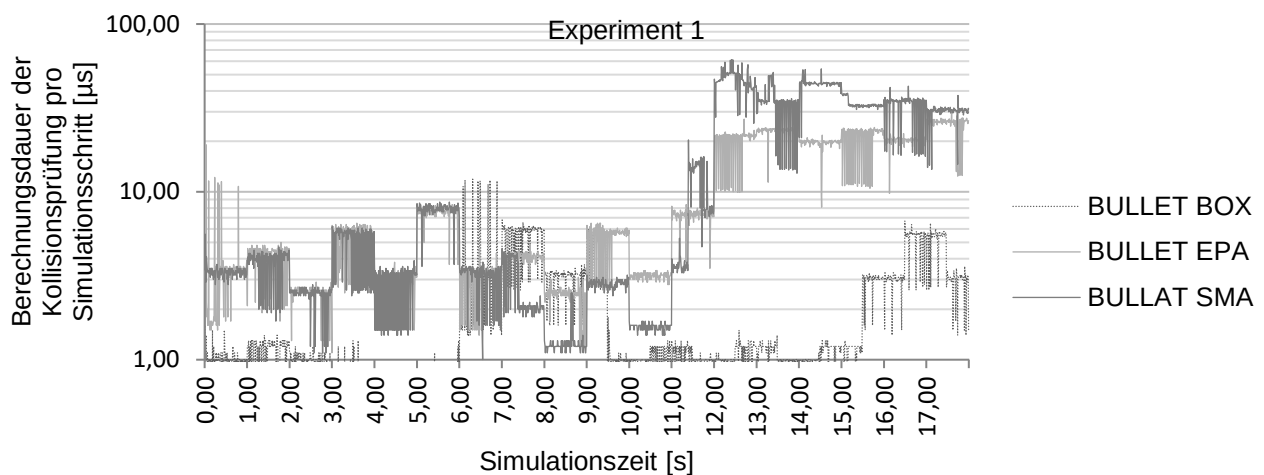


Abbildung 32: Berechnungsdauer der Kollisionsprüfung pro Simulationsschritt [μ s] aufgetragen über der Simulationszeit [s] bei Experiment 1 für die Bibliotheken BULLET BOX, BULLET EPA, BULLET SMA

Alle Bibliotheken weisen bei Experiment 1 ein deterministisches Zeitverhalten auf. Die jeweils maximale Berechnungsdauer ist in Tabelle 9 dargestellt. Es zeigt sich, dass BULLET BOX bei der maximalen Berechnungsdauer um einen Faktor 3 bzw. 6 schneller ist als die

polygonalen Bibliotheken BULLET EPA und BULLET SMA; im Durchschnitt sogar um den Faktor 5 bzw. 7.

Tabelle 9: Maximale und durchschnittliche Berechnungsdauer bei Experiment 1

Eigenschaft	BULLET BOX	BULLET EPA	BULLET SMA
Maximale Berechnungsdauer [μs]	11,90	29,8	61,4
Mittlere Berechnungsdauer [μs]	1,94	10,09	14,79
Mittlere Berechnungsdauer bei Distanz [μ s]	0,77	4,37	4,13
Mittlere Berechnungsdauer bei Berührung [μ s]	2,85	4,25	3,33
Mittlere Berechnungsdauer bei Überlappungen [μ s]	2,21	21,65	36,87

In Abbildung 33 und Abbildung 34 ist die jeweilige Berechnungsdauer mit den Bibliotheken BULLET EPA und BULLET SMA aufgetragen. Es ist erkennbar, dass eine steigende Objektdiskretisierung einen linearen Anstieg der Berechnungsdauer zur Folge hat (vgl. Abbildung 35). Auch bei Experiment 2 weisen BULLET EPA und BULLET SMA ein deterministisches Zeitverhalten auf.

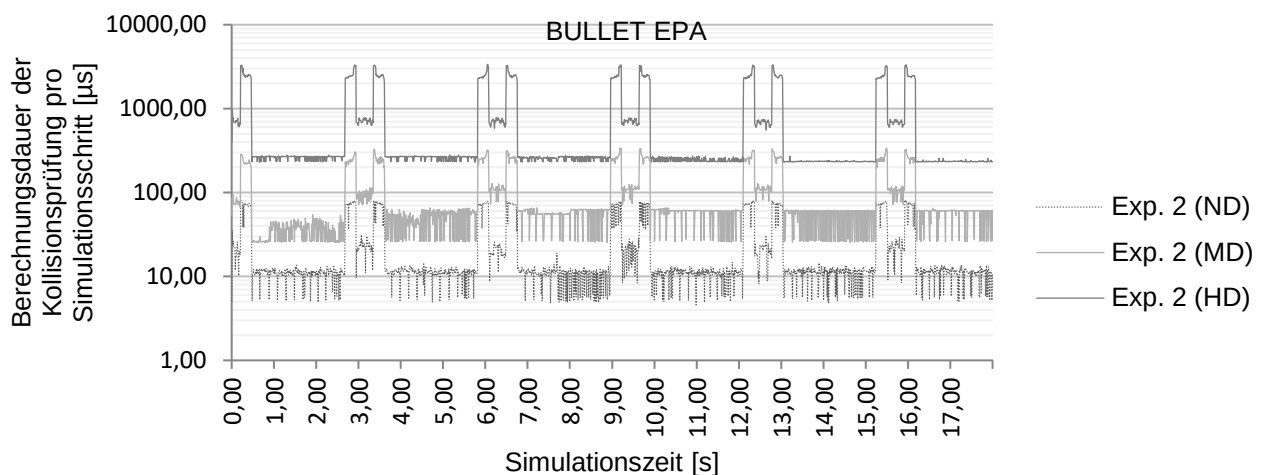


Abbildung 33: Berechnungsdauer der Kollisionsprüfung pro Simulationsschritt [μ s] aufgetragen über der Simulationszeit [s] bei Experiment 2 für die Bibliothek BULLET EPA

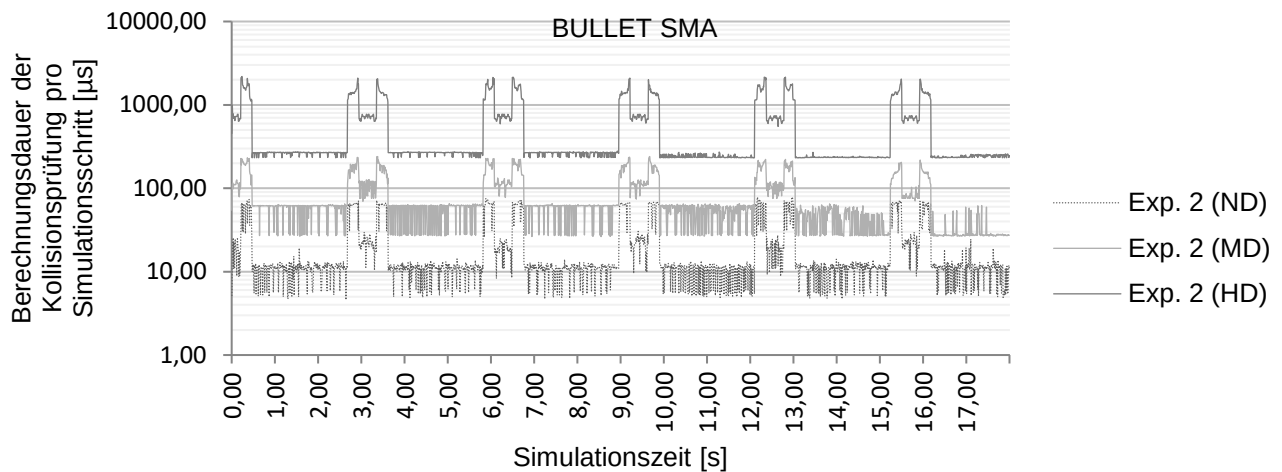


Abbildung 34: Berechnungsdauer der Kollisionsprüfung pro Simulationsschritt [μ s] aufgetragen über der Simulationszeit [s] bei Experiment 2 für die Bibliothek BULLET SMA

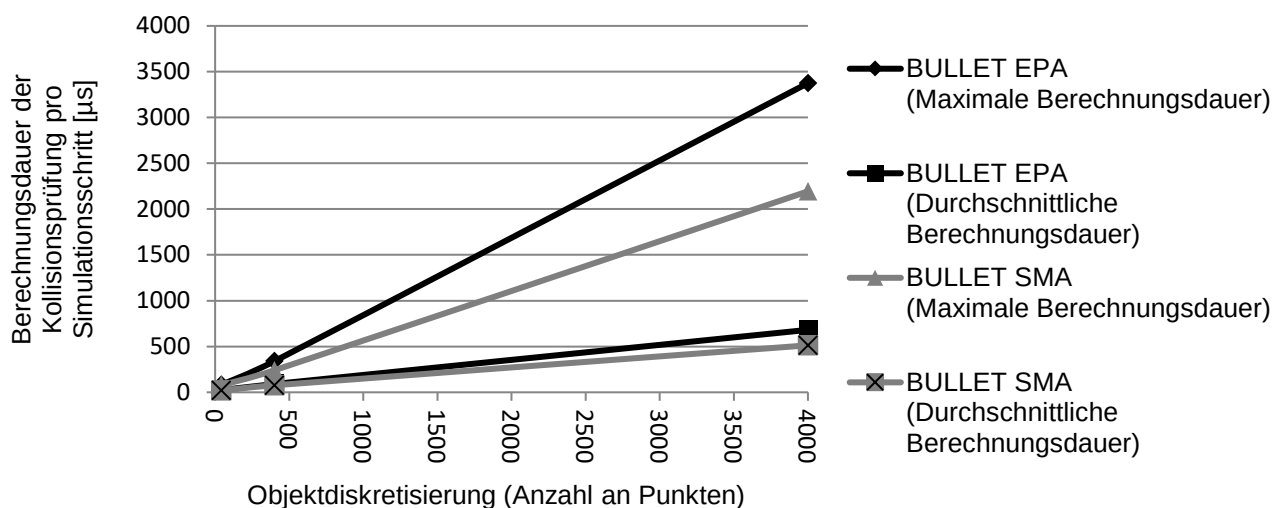


Abbildung 35: Maximale und durchschnittliche Berechnungsdauer der Kollisionsprüfung pro Simulationsschritt [μ s] aufgetragen über der Objektdiskretisierung

Zusammenfassung

Tabelle 10 fasst in einer abschließenden Bewertung die Berechnungsdauer und das deterministische Zeitverhalten zusammen. BULLET BOX ist für die Kollisionsprüfung „Quader-gegen-Quader“ sehr empfehlenswert, kann aber für andere konvexe, polygonale Objektbeschreibungen nicht eingesetzt werden. Eine Kombination aus BULLET BOX für die Kollisionsprüfung „Quader-gegen-Quader“ und BULLET SMA für die anderen Kollisionsprüfungen

ist deshalb das angestrebte Verfahren zur Kollisionsprüfung im GMM. Das Ergebnis zeigt, dass rund 1000 Stückgüter bei einem Zeitbedarf von 10 ms realzeitdeterministisch simuliert werden können. Voraussetzung ist, dass die meisten Materialflusselemente als primitive Quader beschrieben werden können.

Tabelle 10: Abschließende Bewertung der Berechnungsdauer und des Zeitdeterminismus für die Bibliotheken BULLET BOX, BULLET EPA und BULLET SMA

Eigenschaft	BULLET BOX	BULLET EPA	BULLET SMA
Niedrige Berechnungsdauer	+ ¹⁾	o	o
Deterministisches Zeitverhalten	+ ¹⁾	+	+

1) Mit dieser Bibliothek ist nur eine Kollisionsprüfung „Quader-gegen-Quader“ möglich.

+: Erwartungen erfüllt; o: Erwartungen ausreichend erfüllt; –: Erwartungen nicht erfüllt

6.2 Entwurf eines realzeitdeterministischen Hüllkörperverfahrens

Wie bereits beschrieben, sind die Strategien zur Komplexitätsreduzierung elementare Aufgaben der 3D-Kollisionserkennung. Wird hier nicht sehr effizient der Großteil an Kollisionspaarungen ausgeschlossen, reicht die heute zur Verfügung stehende Rechenkapazität nicht aus, um eine realzeitdeterministische Kollisionskontrolle durchzuführen.

Im Folgenden wird eine Kombination aus Hüllkörper- und Priorisierungsverfahren vorgeschlagen, um dem Anwendungsfall der Materialflusssimulation bestmöglich gerecht zu werden.

6.2.1 Algorithmus des Hüllkörperverfahrens

Ein möglicher Algorithmus zur Komplexitätsreduzierung mit Hüllkörperverfahren ist der Sweep-And-Prune-Algorithmus (Ericson 2005). Es sind folgende Hüllkörper möglich:

- eine Kugel mit einem Radius vom Objektmittelpunkt zum entferntesten Hüllkörperpunkt,
- ein statischer Quader mit einer festen Spannweite vom Objektmittelpunkt zum entferntesten Hüllkörperpunkt oder

- ein achsparalleler Quader dessen Breite dynamisch in jedem Simulationsschritt anhand der aktuellen Orientierung des Objektes berechnet wird.

Da die Berechnung des achsparallelen Quaders mit wenigen Rechenoperationen gelöst werden kann und dadurch die meisten rechenintensiven Kollisionsprüfungen ausgeschlossen werden können, wird dieser Hüllkörper gewählt. Außerdem muss der Hüllkörper nur neu berechnet werden, wenn sich ein Objekt bewegt hat. Da bei der Materialflusssimulation insbesondere die Stückgüter mit kleineren und eher proportionalen Objektbeschreibung (im Gegensatz zu den Materialflusselementen) bewegt werden, ist dieser Ansatz besonders geeignet.

In einem rechenaufwändigen Initialisierungsschritt werden die Hüllkörper auf die euklidischen Raumachsen projiziert. Dafür werden drei unabhängige Listen angelegt, denen jedes Objekt jeweils einmal zugeordnet ist. Zusätzlich wird der aktuelle Überlappungsstatus mit jedem anderen Objekt festgehalten. Der Speicherbedarf dafür steigt deshalb mit der Anzahl an Objekten quadratisch an. Zur Laufzeit wird die Liste immer dann neu sortiert, wenn sich ein Objekt bewegt hat.

Wenn auf mindestens einer der drei Raumachsen eine Überlappung ausgeschlossen wird, kann das Objektpaar nicht kollidieren. Eine Kollisionsprüfung zur Bestimmung der Kontaktinformationen kann dann entfallen.

Alle Objektpaare, bei denen eine genaue Kollisionsprüfung notwendig ist, werden dann in einer weiteren Liste gespeichert und an die Kollisionsprüfung übergeben.

6.2.2 Realisierung des Hüllkörperverfahrens

Der Sweep-And-Prune-Algorithmus wurde bereits in zahlreichen öffentlichen und kommerziellen Implementierungen umgesetzt. Bei einer detaillierten Betrachtung zeigten die Referenzimplementierungen in BULLET 2.82 (Coumans 2014), IBDS 1.09 (Bender 2013), SOLID 3.5.6 (Van den Bergen 2003) und SWIFT++ 1.1 (Ehmann 2001) deutliche Unterschiede in der Rechenzeit und dem Speichermanagement.

IBDS und SOLID allokierten in jedem Simulationsschritt dynamisch Speicher und eignen sich demzufolge für die realzeitdeterministische Simulation nicht. Die Implementierung in

BULLET ist so eng mit der Kollisionsprüfung verbunden, dass eine losgelöste Analyse nicht möglich ist.

SWIFT++ allokiert keinen dynamischen Speicher, solange keine Objekte zur Laufzeit hinzugefügt oder entfernt werden. Allerdings kommt es in vereinzelt Simulationsschritten zu signifikanten Rechenzeiterhöhungen. Ursache ist die Ausführung einer Funktion zum Erweitern oder Entfernen von internen Objekten zur Laufzeit, obwohl keine Objekte hinzugefügt oder entfernt worden sind. Da diese Funktion für das GMM nicht benötigt wird, wurde sie für diese Arbeit aus der Implementierung entfernt. Danach verschwand auch die signifikante Rechenzeiterhöhung zwischen einzelnen Simulationsschritten.

Eine im folgenden Kapitel durchgeführte Bewertung des realisierten Hüllkörperverfahrens soll nun die realzeitdeterministischen Eigenschaften bestätigen.

6.2.3 Bewertung des Hüllkörperverfahrens

6.2.3.1 Experimente

Abbildung 36 zeigt die Versuchsanordnung zur Bestimmung der realzeitdeterministischen Berechnungseigenschaften des realisierten Hüllkörperverfahrens. Es werden 40, 100, 400 und 1000 Objekte in Kreisen mit je 20 Objekten initialisiert und pro Ring so nach außen verschoben, dass diese sich noch leicht überlappen (vgl. Abbildung 36, links). Unter Annahme der zeitlichen und räumlichen Kohärenz werden die Objekte auf den Kreisbahnen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten v_1 bis v_m bewegt, so dass Überlappungen zu Stande kommen (vgl. Abbildung 36, rechts).

Dieses Szenario wurde gewählt da sich bei der Materialflusssimulation viele Stückgüter bewegen und diese meist nur ein bis zwei Kontakte ausbilden. Durch die niedrige und hohe Anzahl an Objekten soll überprüft werden, inwieweit sich eine Vielzahl an Stückgütern auf den Simulationslauf auswirkt.

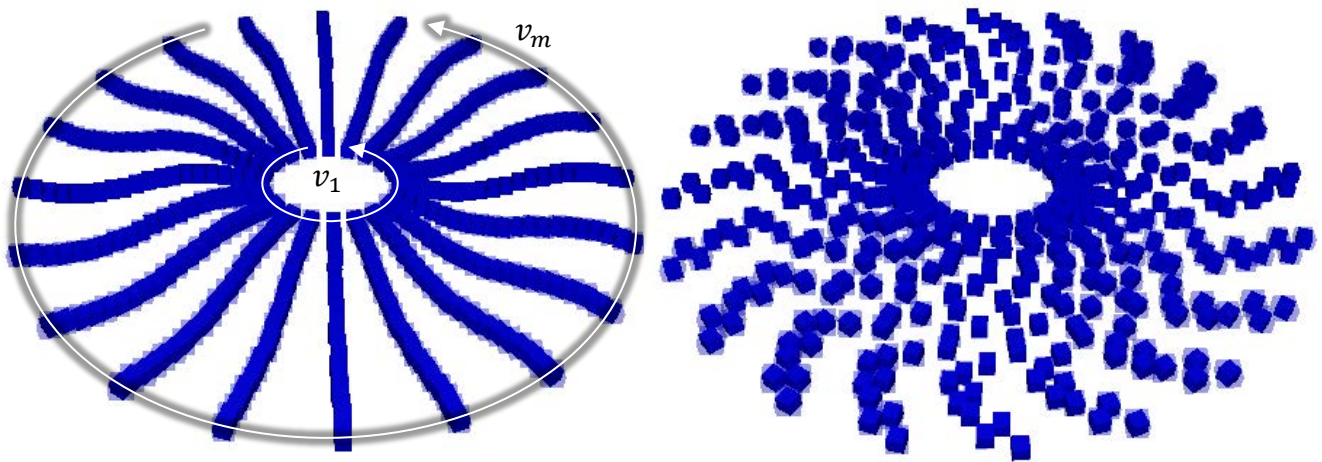


Abbildung 36: Versuchsanordnung zur Bestimmung der realzeitdeterministischen Berechnungseigenschaften des realisierten Hüllkörpervorgangs (Links: Initiale Objektpositionen; Rechts: Objektbewegungen zur Laufzeit)

In einer Variation der Versuchsanordnung werden ebenfalls alle Objekte initialisiert, allerdings nur die inneren beiden Kreise (40 Objekte) bewegt.

Die Simulation wird wie bei den Experimenten zur Bewertung der Kollisionsprüfung 18 s mit einer Simulationsschrittweite von 10 ms in der Echtzeiterweiterung des Betriebssystems ausgeführt.

6.2.3.2 Ausreichende Genauigkeit und Robustheit

Sobald die achsparallelen Hüllkörper einer Objektpaarung überlappen, wurden diese in die Liste der Objektpaare zur Kollisionsprüfung eingetragen. Die **ausreichende Genauigkeit** war bei allen Experimenten **gegeben**.

Das realisierte Hüllkörpervorgang war zu jedem Zeitpunkt **robust**. Alle Simulationsläufe konnten problemlos und ohne Abstürze in der Echtzeiterweiterung des Betriebssystems ausgeführt werden.

6.2.3.3 Speichermanagement

Tabelle 11 beschreibt den Speicherbedarf für das realisierte Hüllkörpervorgang. Der benötigte Speicherbedarf für das Interface steigt nahezu quadratisch an.

Dieser Einfluss fällt zunächst bei 400 achsparallelen Quadern auf, da hier der Speicherbedarf etwa 1 MB beträgt. Bei 1000 achsparallelen Quadern sind es fast 8 MB. 4000 achsparallele Quader lassen sich nicht mehr initialisieren, da lediglich 100 MB dynamischer Speicher in der Echtzeiterweiterung TwinCAT zur Verfügung stehen.

Wie bereits die Auswahl der Verfahren zur Kollisionsprüfung in Kapitel 6.1.4.5 zeigte, ist eine Materialflusssimulation mit mehr als 1000 Stückgütern in Realzeit mit der heute zur Verfügung stehenden Rechenleistung nicht möglich. Das realisierte Hüllkörperverfahren ermöglicht ebenfalls lediglich eine Initialisierung von bis zu maximal 1000 Objekten.

Tabelle 11: Bewertung des Speicherbedarfs für das realisierte Hüllkörperverfahren in Abhängigkeit der Anzahl an achsparallelen Quadern

Eigenschaft	40 achsp. Quader	100 achsp. Quader	400 achsp. Quader	1000 achsp. Quader
Speicherbedarf Quader [KB]	17	35	125	304
Speicherbedarf Interface [KB]	14	83	1290	8024
Dynamischer Laufzeitspeicher [KB]	0	0	0	0
Realzeit-Speichermanagement	+	+	+	o

+ : Erwartungen erfüllt; o : Erwartungen ausreichend erfüllt; – : Erwartungen nicht erfüllt

6.2.3.4 Berechnungsdauer und Zeitdeterminismus

Die Messung in Abbildung 37 zeigt die Berechnungsdauer des realisierten Hüllkörperverfahrens pro Simulationsschritt aufgetragen über der Simulationszeit für 40, 100, 400 und 1000 bewegte Objekte. Die Berechnungsdauer für das Hüllkörperverfahren steigt mit der Anzahl der bewegten Objekte an. Während für 40 bewegte Objekte die maximale Berechnungsdauer unter 10 μ s liegt, steigt diese für 100 bewegte Objekte auf 41 μ s Sekunden an und liegt für 400 bewegte Objekte bereits bei 330 μ s Sekunden.

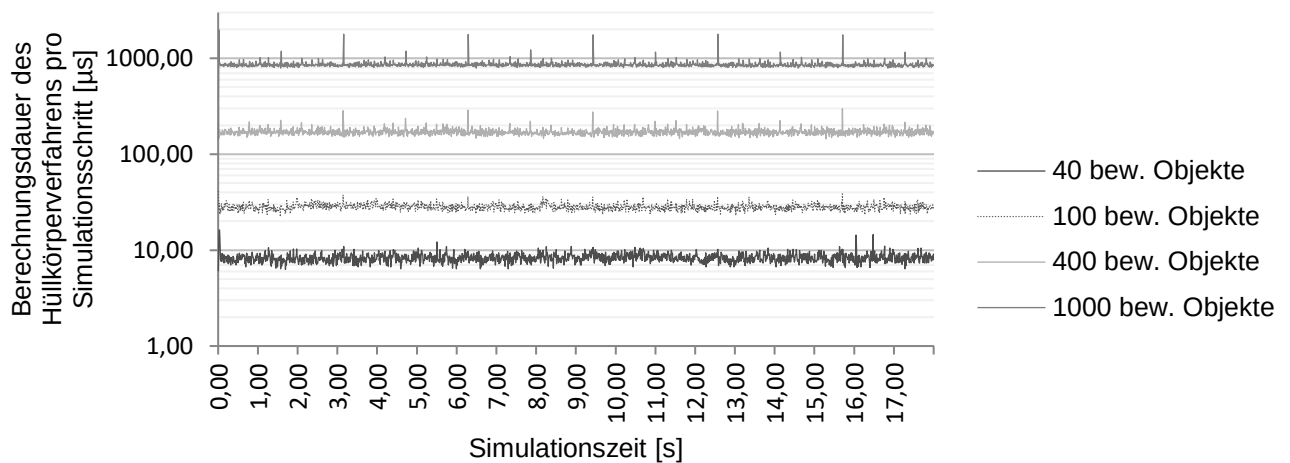


Abbildung 37: Berechnungsdauer des realisierten Hüllkörperverfahrens pro Simulationsschritt [μs] aufgetragen über der Simulationszeit [s] für 40, 100, 400 und 1000 bewegte Objekte

Bei 1000 bewegten Objekten sind bei den Winkelstellungen $\pi/2$, π , ..., $m \cdot \pi/2$ deutliche Rechenanstiege zu verzeichnen. Dieser Effekt wird darauf zurückgeführt werden, dass zwar in den Objektbewegungen zeitliche und räumliche Kohärenz vorliegt, allerdings in den achsparallelen Listen beim Sortieren bei diesen Positionen mehrere Listenplätze übersprungen werden müssen. Dieser Effekt wird noch deutlicher, wenn 1000 Objekte initialisiert werden, aber nur 40 Objekte bewegt werden (vgl. Abbildung 38). Die durchschnittliche Berechnungsdauer bleibt dann zwar nahezu konstant bei 10 μs für die 40 bewegten Objekte, allerdings ergeben sich insbesondere bei einer hohen Anzahl von statischen Objekten deutliche Rechenzeitspitzen.

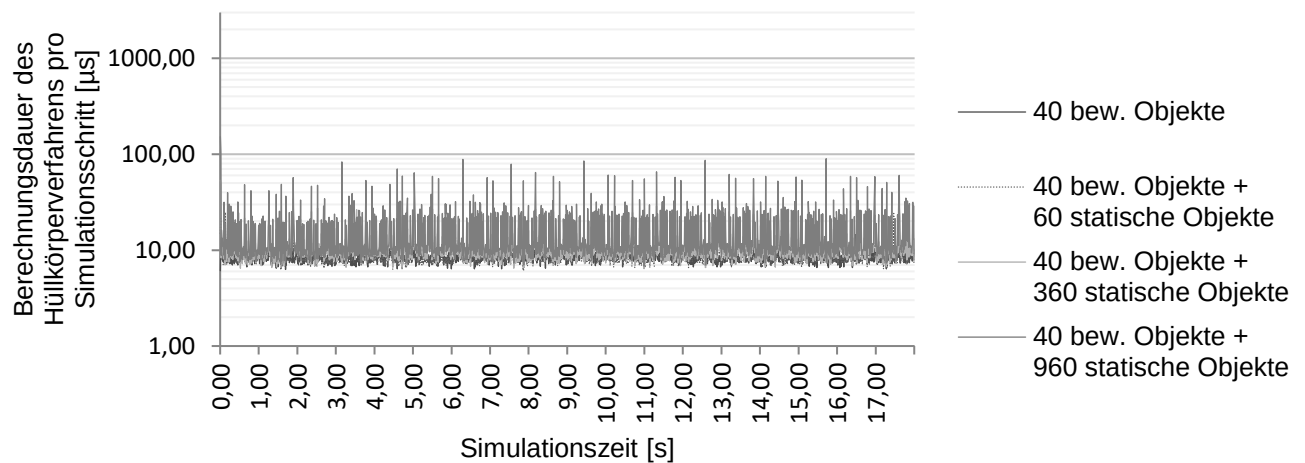


Abbildung 38: Berechnungsdauer des realisierten Hüllkörperverfahrens pro Simulationsschritt [μs] aufgetragen über der Simulationszeit [s] für 40 bewegte Objekte und 60, 360 und 960 statische Objekte

In Abbildung 39 zeigt deshalb die Berechnungsdauer des realisierten Hüllkörperverfahrens pro Simulationsschritt über der Anzahl an statischen und bewegten Objekten. Im GMM lassen sich demzufolge bis zu 1000 Objekte initialisieren; allerdings sollten zeitgleich nicht mehr als 400 Objekte bewegt werden, um eine durchschnittliche bzw. maximale Berechnungsdauer von 171 μs bzw. 554 μs nicht zu übersteigen.

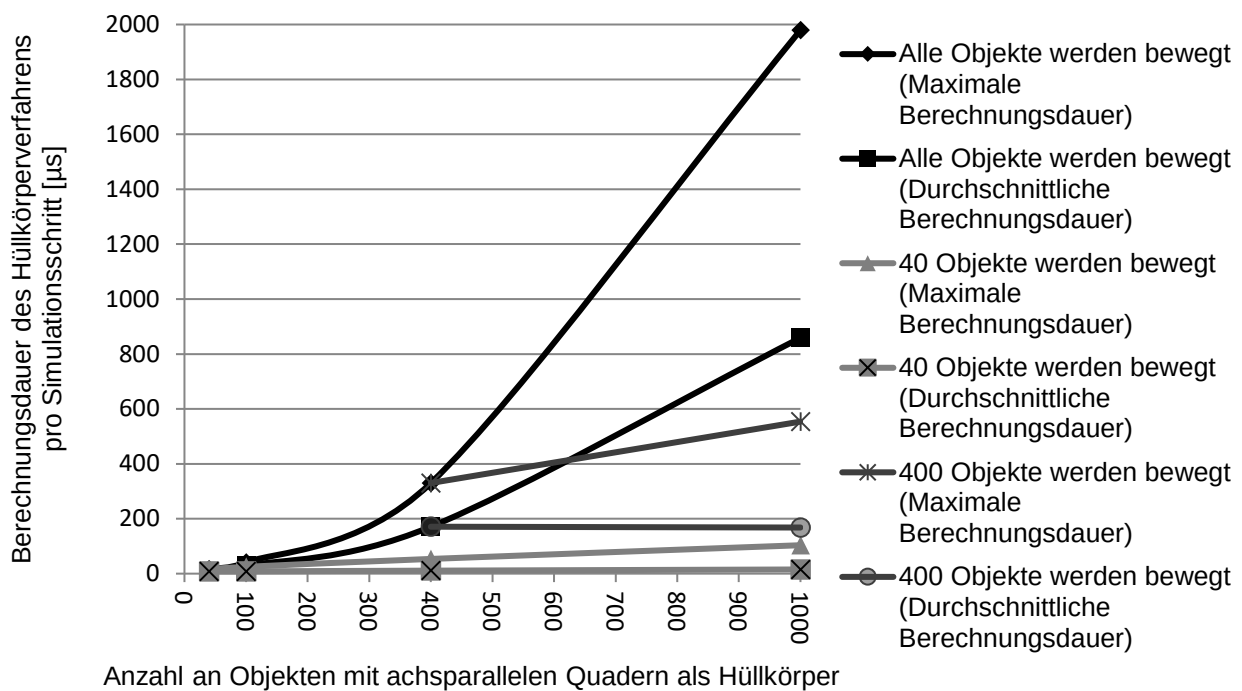


Abbildung 39: Berechnungsdauer des realisierten Hüllkörperverfahrens pro Simulationsschritt [μs] aufgetragen über der Anzahl an statischen und bewegten Objekten

6.3 Entwurf eines realzeitdeterministischen Priorisierungsverfahrens

In Kapitel 5.3.7 wurde gezeigt, dass die Kollisionsprüfung im GMM nicht willkürlich erfolgen darf, sondern einem definierten Schema folgen muss. Im Folgenden wird deshalb ein realzeitdeterministisches Priorisierungsverfahren hergeleitet, das diesen Anforderungen gerecht wird.

6.3.1 Algorithmus und Realisierung des Priorisierungsverfahrens

In dem Priorisierungsverfahren werden aus der Liste der Kollisionspaare vom Hüllkörperverfahren durch Gruppenausschluss die passenden Kollisionspaare ermittelt.

Im realisierten Priorisierungsverfahren werden alle zu überwachenden Kollisionsobjekte einer jeweiligen Kollisionsgruppe zugeordnet. Das Priorisierungsverfahren durchläuft die Liste der Kollisionspaare mehrmals und entscheidet anhand der Durchlaufphase und der Objektgruppenpaarung, ob eine Kollisionsprüfung und Impulsberechnung durchgeführt werden soll.

6.3.2 Bewertung des Priorisierungsverfahrens

Für die Bewertung des Priorisierungsverfahrens wird eine Liste mit 40, 100, 400 und 1000 Kollisionspaaren durchlaufen und die Berechnungsdauer gemessen.

Alle Objektpaarungen wurden zuverlässig erkannt; die ausreichende Genauigkeit ist folglich gegeben. Die Kodeausführung verursachte keine Robustheitsprobleme. Der benötigte Speicherbedarf lag immer unter vernachlässigbaren 2 KB.

In Abbildung 40 ist die Berechnungsdauer des realisierten Priorisierungsverfahrens pro Simulationsschritt aufgetragen über der Anzahl an Kollisionspaaren. Mit steigender Anzahl an Kollisionspaaren nimmt die Berechnungsdauer linear zu. Das Priorisierungsverfahren eignet sich demzufolge für das GMM.

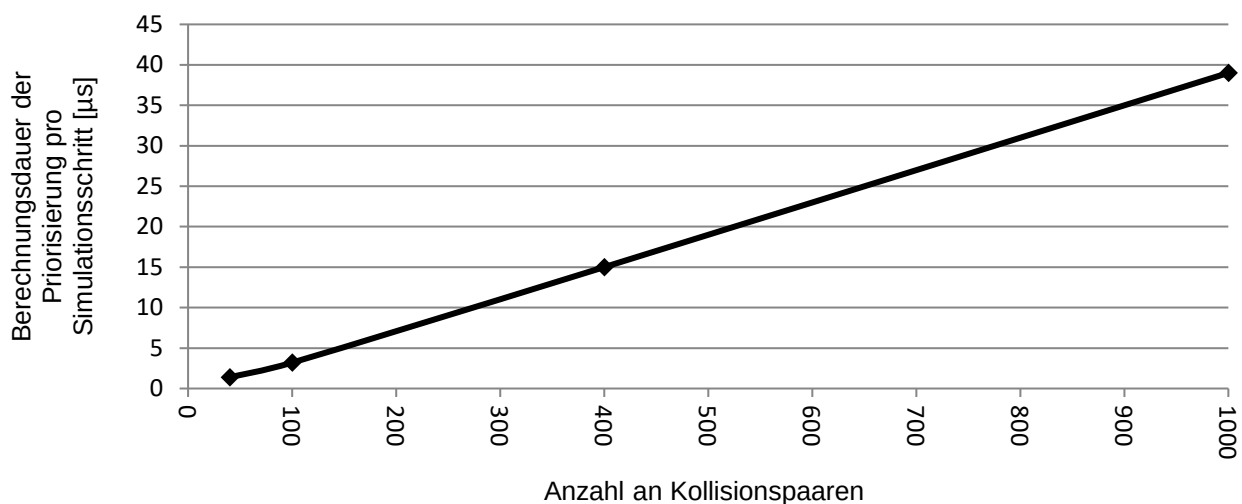


Abbildung 40 Berechnungsdauer des realisierten Priorisierungsverfahrens pro Simulationsschritt [μs] aufgetragen über der Anzahl an Kollisionspaaren

6.4 Analyse des Laufzeit- und Speicherplatzbedarfs

Die realisierte realzeitdeterministische Kollisionserkennung gliedert sich in drei Phasen:

- Berechnung des realzeitdeterministischen Hüllkörperverfahrens für die initialisierten Objekte,
- Berechnung des realzeitdeterministischen Priorisierungsverfahrens für alle möglichen Kollisionspaare und

- Berechnung der Kollisionsprüfung für die priorisierten Kollisionspaare.

In den Kapiteln 6.2 und 6.3 wurden die Verfahren ausführlich beschrieben und bewertet. In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse der realisierten Verfahren bezüglich des Laufzeitbedarfs und des Speicherplatzbedarfs zusammengefasst.

6.4.1 Analyse des Hüllkörperverfahrens

Laufzeit wird nur benötigt, falls ein Objekt bewegt wird. Ansonsten wird für keine Rechenkapazität verbraucht:

$$OP_{\text{SNP}} = N_{\text{Bewegt}} \cdot (c_{\text{SNP1}} + c_{\text{SNP2}}(N_{\text{Gesamt}})) ,$$

wobei N_{Bewegt} die Anzahl der bewegten Objekte während eines Simulationsschrittes ist und c_{SNP1} und c_{SNP2} zwei Rechenzeitkonstanten sind.

Aus Abbildung 38 und Abbildung 39 kann gefolgert werden, dass $c_{\text{SNP2}}(N_{\text{Gesamt}})$ im schlechtesten Fall zu kleineren Rechenzeitspitzen führt, allerdings auf die durchschnittliche Berechnungsdauer kaum Auswirkungen hat. In erster Näherung ergibt sich die Laufzeit des realisierten Hüllkörperverfahrens zu

$$OP_{\text{SNP}} \approx N_{\text{Bewegt}} \cdot c_{\text{SNP1}} ,$$

wobei für das Testsystem

$$c_{\text{SNP1}} = 0.85 \mu\text{s}$$

gilt.

Für das Hüllkörperverfahren wird zur Laufzeit kein dynamischer Speicher allokiert. Der Speicherbedarf bei der Initialisierung Mem_{SNP} folgt der Formulierung:

$$\text{Mem}_{\text{SNP}}(N_{\text{Gesamt}}^2, N_{\text{Gesamt}}) = \text{Mem}_{\text{SNP,Interface}}(N_{\text{Gesamt}}^2) + \text{Mem}_{\text{SNP,Hüllkörper}}(N_{\text{Gesamt}}) ,$$

mit

$$\text{Mem}_{\text{SNP,Interface}}(N_{\text{Gesamt}}^2) = \frac{N_{\text{Gesamt}} \cdot (N_{\text{Gesamt}} - 1)}{2} \cdot m_{\text{SNP,Interface}}$$

und

$$\text{Mem}_{\text{SNP,Hüllkörper}}(\mathcal{O}(N_{\text{Gesamt}})) = N_{\text{Gesamt}} \cdot m_{\text{SNP,Hüllkörper}}$$

wobei N_{Gesamt} die Gesamtheit aller Kollisionsobjekte ist und $m_{\text{SNP,Interface}}$ und $m_{\text{SNP,Hüllkörper}}$ zwei Speicherkonstanten, die für das Testsystem mittels der konstruktiven Vorgehensweise ermittelt wurden.

Nach Tabelle 11 ergibt sich:

$$m_{\text{SNP,Interface}} \cong 0.016 \text{ KB}$$

und

$$m_{\text{SNP,Hüllkörper}} \cong 0.35 \text{ KB.}$$

Da der Speicherbedarf für das Interface des Hüllkörperverfahrens quadratisch mit der Anzahl an Objekten steigt, folgt:

$$\text{Mem}_{\text{SNP,Hüllkörper}} \ll \text{Mem}_{\text{SNP,Interface}}.$$

Daraus ergibt sich in erster Näherung der Speicherbedarf für das Hüllkörperverfahren:

$$\text{Mem}_{\text{SNP}} \approx \frac{N_{\text{Gesamt}} \cdot (N_{\text{Gesamt}} - 1)}{2} \cdot m_{\text{SNP,Interface}}.$$

6.4.2 Analyse des Priorisierungsverfahrens

Bei dem Priorisierungsverfahren werden immer alle Objektpaare durchlaufen, die von der Komplexitätsreduzierung nicht ausgeschlossen wurden. Dann wird für jedes Paar überprüft, ob in der aktuellen Durchlaufphase eine Kollisionsprüfung durchgeführt werden muss.

Aus Abbildung 40 ist ersichtlich, dass die Rechenzeit des Priorisierungsverfahrens $\text{OP}_{\text{Priorisierung}}$ linear mit der Anzahl der aus dem Hüllkörperverfahren bestimmten Kollisionspaare $N_{\text{Kollisionspaare}}$ ansteigt:

$$\text{OP}_{\text{Priorisierung}} = N_{\text{Priorisierung,Durchlaufphasen}} \cdot N_{\text{Kollisionspaare}} \cdot c_{\text{Priorisierung}},$$

wobei $N_{\text{Priorisierung,Durchlaufphasen}}$ die Anzahl der Durchlaufphasen beschreibt und $c_{\text{Priorisierung}}$ eine Rechenzeitkonstante ist, die sich auf dem Testsystem zu

$$c_{\text{Priorisierung}} = 0.04 \mu\text{s}$$

ergab (vgl. Abbildung 40).

Für die Priorisierung muss lediglich die Gruppenzugehörigkeit pro Objekt gespeichert werden. Der Speicherbedarf kann deshalb vernachlässigt werden:

$$\text{Mem}_{\text{Priorisierung}} \approx 0 \text{ KB.}$$

6.4.3 Analyse der Kollisionsprüfung

Die Kollisionsprüfung, also die Bestimmung der Kontaktinformationen, stellt den komplexesten Teil der realzeitdeterministischen Kollisionserkennung dar. Deren Eigenschaften, sowie deren Vor- und Nachteile wurden bereits ausführlich in Kapitel 6.1 besprochen. Aufgrund der vorgenommenen Analysen wird für die Materialflusssimulationen eine Kombination aus BULLET BOX für die Kollisionsprüfung „Quader-gegen-Quader“ und BULLET EPA für alle anderen polygonalen, konvexen Objektbeschreibungen gewählt.

Mit der realisierten Kollisionsprüfung kann für den Speicherbedarf $\text{Mem}_{\text{Kollisionsprüfung}}$ die folgende Formulierung aus Tabelle 8 und der Laufzeitbedarf $\text{OP}_{\text{Kollisionsprüfung}}$ abgeleitet werden:

$$\text{OP}_{\text{Kollisionsprüfung}} \approx \sum_{i=1}^{N_{\text{Paare,Priorisierung}}} c_{\text{Kollisionsprüfung}} \cdot N_{\text{Diskretisierung},i},$$

$$\text{Mem}_{\text{Kollisionsprüfung}} \approx \sum_{i=1}^{N_{\text{Gesamt}}} m_{\text{Kollisionsprüfung}} \cdot N_{\text{Diskretisierung},i}.$$

wobei $N_{\text{Diskretisierung}}$ die Anzahl Diskretisierungspunkte pro Objekt sind.

Für das Testsystem ergibt sich (vgl. Tabelle 8, Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34)

$$m_{\text{Kollisionsprüfung}} \approx 0.165 \text{ KB}$$

und

$$c_{\text{Kollisionsprüfung}} \approx 0.175 \mu\text{s}.$$

Wird die Kollisionsprüfung mit BULLET BOX durchgeführt, gilt

$$m_{\text{Kollisionsprüfung}} \cdot N_{\text{Diskretisierung},i} \approx 2.5\mu\text{s}.$$

6.5 Zusammenfassung

Die Kollisionserkennung, die ein zentrales Element des computerrechenbaren Simulationsmodells darstellt, wurde in Kapitel 5 zunächst nicht berücksichtigt und erst nachfolgend gesondert in diesem Kapitel besprochen. Die Kollisionserkennung besteht in dieser Arbeit aus einer Kollisionsprüfung zur Ermittlung der benötigten Kontaktinformationen, einem Priorisierungsverfahren und einem Hüllkörperverfahren.

Da in anderen Domänen, wie beispielsweise Computerspielen, zahlreiche Kollisionserkennungen realisiert sind, wurden zunächst Unterscheidungsmerkmale und Anforderungen für ein GMM herausgearbeitet. Daraufhin konnten verschiedene Realisierungen ausgewählt werden, die für das GMM geeignet sein konnten. Als geeignet erschienen zunächst die Implementierungen in den Bibliotheken IBDS, BULLET, SOLID, SWIFT++ und V-Clip.

Durch verschiedene Experimente und deren konstruktiver und experimenteller Bewertung wurde schlussendlich gefolgert, dass durch eine Kombination aus vorhandenen Implementierungen eine realzeitdeterministische Kollisionserkennung möglich ist. Die Implementierungen in BULLET ermöglichen eine Kollisionsprüfung von bis zu 5000 Objektpaaren bei einem Simulationstakt von 10 ms, wenn als Kollisionsgeometrie überwiegend quaderförmige Objekte angenommen werden. Als Hüllkörperverfahren konnte die Implementierung des Sweep-And-Prune-Algorithmus in der Bibliothek Swift++ identifiziert werden, die aufgrund von Speicherlimitierung maximal 1000 Objekte handhaben kann. Das Priorisierungsverfahren wurde in einer eigenen Implementierung mittels Durchlaufen einer Liste realisiert.

Durch das Mischen der unterschiedlichen Implementierungen für die Kollisionsprüfung, das Hüllkörperverfahren und das Priorisierungsverfahren und Zusammenführen in einer Simulationsumgebung können alle gestellten Anforderungen erfüllt werden. Die Untersuchungen in diesem Kapitel wiesen nach, dass es dann möglich ist, bis zu 1000 Objekte bei einem Simulationstakt von 10 ms abzubilden. Dabei wird vorausgesetzt, dass maximal 5 Kontakte pro Objekt auftreten und es sich meist um quaderförmige Objektbeschreibungen handelt. Diese Anforderungen stellen für eine Materialflusssimulation allerdings kaum eine Einschränkung dar, da Stückgut meist kontaktfrei im Materialflusssystem transportiert wird.

Kapitel 7

Modellierung

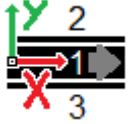
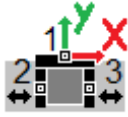
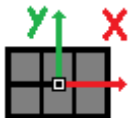
Im Simulationswerkzeug ISG-virtuos wurde ein Modellierungswerkzeug auf Basis von Blockschaltbildern realisiert (vgl. Kapitel 11.1). Dieses Modellierungswerkzeug wird für diese Arbeit um Modellblöcke zur Modellierung des Materialflusssystems mit dem GMM erweitert. Dadurch gliedert sich der neue Materialflusssimulationsansatz optimal in das eingesetzte Simulationswerkzeug ISG-virtuos ein (vgl. Kapitel 11.1) und bietet eine einfache Anbindung an die bereits vorhandenen Modellblöcke für Logik, Motoren und so weiter. Für den Benutzer des Simulationswerkzeugs ergibt sich der Vorteil, dass er bereits vorhandene Modelle weiterhin nutzen kann und sein Simulationsmodell nun mit den Modellblöcken des GMMs erweitern kann.

7.1 Blockschaltbildbasierte Modellierung

In den Kapiteln 5.2.3 und 5.3 wurde gezeigt, dass bei dem realisierten GMM auch bei einer kinematischen Kollisionserkennung keine Transitionsbedingungen mehr notwendig sind. Jedes Materialflusselement kann anhand seiner geometrischen 3D-Objektbeschreibung unabhängig modelliert werden. Anschließend werden die Aktor- und Sensorsysteme mit den jeweiligen Materialflusselementen verknüpft. Aus den einzelnen Materialflusselementen wird dann anhand der realzeitdeterministischen Kollisionserkennung und Kollisionserkennung das Verhalten des Gesamtsystems berechnet.

Tabelle 12 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit neu hinzugekommenen Materialflusselemente. Zu jedem Symbol im Blockschaltbild-Editor wird kurz das simulierte Verhalten des Materialflusselements beschrieben.

Tabelle 12: Symbol und Beschreibung der realisierten Materialflusselemente im GMM

Symbol	Beschreibung
	Linearförderer Der Linearförderer-Baustein beschreibt die lineare Bewegung von Stückgut auf einem bandgeführten Linearführer mit ebener Lauffläche. Optional können Banden parametrisiert werden, die eine Seitenführung oder Spurführung des Stückguts ermöglichen.
	Serielle Achse Der Achse-Baustein bildet eine einzelne serielle Achse eines Robotersystems ab. Mehrere Achse-Bausteine können zu einer seriellen Kette miteinander verknüpft werden (z. B. zu einem Roboter).
	Greifer Der Greifer-Baustein bildet ein kinematisches Greifsystem ab. Die Simulation des Greiferrückens kann bei Bedarf deaktiviert werden.
	Sperre Der Sperre-Baustein bildet eine Sperre ab und erlaubt im Gegensatz zum Achse-Baustein eine vereinfachte Parametrierung der geometrischen 3D-Objektbeschreibung.
	Lagertechnik Der Lagertechnik-Baustein bildet eine Lagerregalzeile ab. Stückgüter können auf diesem Materialflusselement auch in Blocklagerung abgelegt werden.
	Bereichssensor Mit dem Bereichssensor-Baustein wird ein Volumenbereich eines Messsystems abgebildet. Durch die Reduzierung des Volumenbereichs können auch Flächen- und Linienbereiche approximiert werden.
	Stückgutvorratsspeicher Mit dem Stückgutvorratsspeicher-Baustein wird der Vorrat an Stückgütern definiert, die während eines Simulationslaufs zur Verfügung stehen.



Einlasten

Mit dem Einlasten-Baustein kann Stückgut zu einem beliebigen Zeitpunkt aus dem Stückgutvorratsspeicher ins Materialflusssystem eingelastet werden.



Auslasten

Mit dem Auslasten-Baustein kann Stückgut zu einem beliebigen Zeitpunkt aus dem Materialflusssystem ausgelastet werden und wird dann zurück in den Stückgutvorratsspeicher verschoben.

Um ein möglichst effizientes Modellieren mit dem Modellierungswerkzeug zu ermöglichen, wurde ein modulares Konzept zur Definition der Stellgrößen und der Messsignale an den Materialflusselementen entworfen. Dadurch können die Ein- und Ausgänge der Modellblöcke der Materialflusselemente nahezu einheitlich gestaltet werden. Jeder Modellblock besitzt die zwei Eingänge „Vorgeschaltete Achse“ und „Aktor“.

Der Eingang „Vorgeschaltete Achse“ kann mit einem Achsen-Baustein verknüpft werden. Dadurch kann jedes Materialflusselement in einfachster Weise translatorisch und rotatorisch im Raum bewegt werden.

Der Eingang „Aktor“ ermöglicht es, das benötigte Aktorsystem anzuschließen. Über einen Aktor-Multiplexer-Baustein können mehrere Aktorsysteme zusammengefasst werden und an das Materialflusselement angeschlossen werden. In Tabelle 13 sind die realisierten Aktorsysteme zusammengefasst. Zu jedem Symbol im Blockschaltbild-Editor wird kurz das simulierte Verhalten des Aktorsystems beschrieben.

Tabelle 13: Symbol und Beschreibung der realisierten Aktorsysteme im GMM

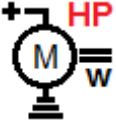
Symbol	Beschreibung
	Rotatorischer Motor Erzeugt eine rotatorische Geschwindigkeitsvorgabe im Gelenkpunkt des Materialflusselements aus den verknüpften Stellsignalen der Steuerungssysteme.
	Linearer Motor Erzeugt eine lineare Geschwindigkeitsvorgabe im Gelenkpunkt des Materialflusselements aus den verknüpften Stellsignalen der Steuerungssysteme.
	Bandmotor Erzeugt die Geschwindigkeitsvorgabe eines Bandes und der Seitenführung aus den verknüpften Stellsignalen der Steuerungssysteme. Dieser Baustein darf nur mit dem Aktor-Eingang von Linearförderer-Bausteinen verknüpft werden.
	RFID-Schreibgerät Schreibt bis zu vier Werte auf den Datenspeicher von Stückgut. Die Daten werden nur geschrieben, wenn sich das Stückgut im Volumenbereich des RFID-Schreibgeräts befindet. Dieser Baustein darf nur mit Bereichssensor-Bausteinen verknüpft werden.
	Aktor-Multiplexer Fasst die Vorgaben von mehreren Aktoren in einem gemeinsamen Aktorsystem zusammen.

Abbildung 41 zeigt das Modellschaltbild eines Teleskopgurtförderers mit zwei Aktorsystemen. Dafür wurde der Eingang „Vorgeschaltete Achse“ des Materialflusselements „Linearförderer“ mit dem Materialflusselement „Achse“ verknüpft. Am Eingang „Aktor“ des Materialflusselements „Förderer“ ist ein Aktorsystem vom Typ „Bandmotor“ angebracht, der das Förderband antreibt. Am Eingang „Aktor“ des Materialflusselements „Serielle Achse“ ist ein linearer Motor verknüpft, der die Achse im Gelenkpunkt entlang der X-Achse bewegt. An

den Eingängen der Motoren können die Sollstellgrößen aus dem Steuerungssystem verknüpft werden. Die Verbindung eines Stellsignals mit dem Steuerungssystem wird über die grünen Kreise dargestellt.

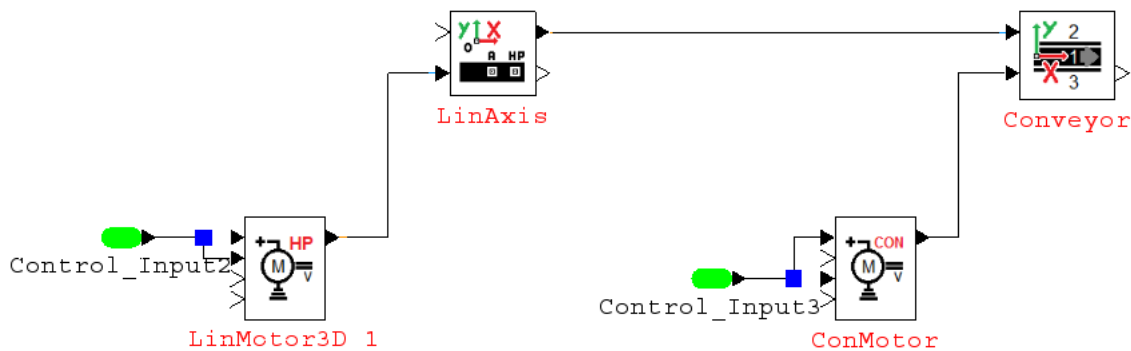


Abbildung 41: Modellschaltbild eines Teleskopgurtförderers mit vorgeschalteten Aktorsystemen

Die Materialflusselemente vom Typ „Achse“ haben je einen Ausgang „Nachgeschaltete Achse“, der mit dem Eingang „vorgeschaltete Achsen“ der Materialflusselemente verknüpft werden kann (vgl. Abbildung 41).

Jedes Materialflusselement besitzt weiterhin einen Ausgang „Sensor“. An diesen Ausgang können beliebige Messsysteme angebunden werden. Die realisierten Sensorsysteme sind in *Tabelle 14* dargestellt. Zu jedem Symbol im Blockschaltbild-Editor wird kurz das simulierte Verhalten des Messsystems beschrieben.

Tabelle 14: Symbol und Beschreibung der realisierten Sensorsysteme im GMM

Symbol	Beschreibung
	Position und Orientierung Liest die Position und Orientierung der geometrischen 3D-Objektbeschreibungen eines Materialflusselements aus.
	RFID-Lesegerät Liest den Datenspeicher eines Stückguts aus. Es können bis zu 4 Datenwerte gelesen werden. Dieser Baustein darf nur mit Bereichssensor-Bausteinen verknüpft werden.
	Element-Visualisierung Überträgt die geometrische 3D-Objektbeschreibung an die 3D-Visualisierung.

In Abbildung 42 ist der Anschluss von zwei Messsystemen an dem Ausgang „Sensor“ des Materialflusselements „Linearförderer“ dargestellt. Das Messsystem „Position und Orientierung“ liest die aktuelle Position und Orientierung des Materialflusselements aus und übergibt diese an die Materialflussteuerung. Der Modellbaustein „Element-Visualisierung“ überträgt die 3D-Objektbeschreibung an die 3D-Visualisierung.

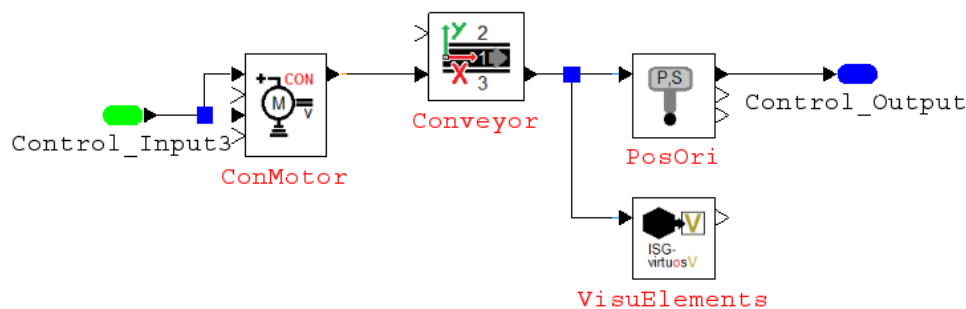


Abbildung 42: Modellschaltbild eines Teleskopgurtförderers mit nachgeschalteten Messsystemen

Identifikationssysteme ermöglichen nicht nur das Erkennen und Identifizieren von Stückgut, sondern ermöglichen auch das Lesen und Schreiben von Daten auf Stückgut. Zur Realisierung dieser Funktionalität besitzt das Materialflusselement „Bereichssensor“ jeweils einen

weiteren Aktor-Eingang „Stückgutaktor“ und einen weiteren Sensorausgang „Stückgut-sensor“. An diesen Ein- und Ausgängen kann auf Stückgüter zugegriffen werden, solange sich diese im Volumenbereich des Sensors befinden.

Abbildung 43 zeigt die Realisierung eines Identifikationssystems mit dem Materialflusselement „Bereichssensor“. Am Eingang „Stückgutaktor“ ist ein RFID-Schreibgerät angeschlossen, das das Schreiben von vier Attributen auf den Datenspeicher des Stückguts ermöglicht. Am Ausgang „Stückgutsensor“ ist ein entsprechendes RFID-Lesegerät verknüpft. Mit diesem können die Attribute des Stückguts ausgelesen werden.

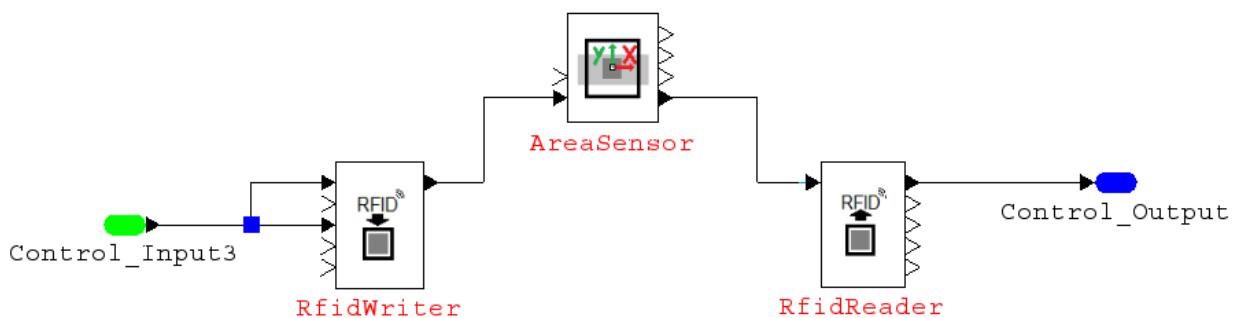


Abbildung 43: Modellschaltbild eines Identifikationssystems

7.2 Zusammenfassung

Der Handlungsbedarf in dieser Arbeit ergab sich insbesondere durch den hohen Modellerstellungsaufwand für die einzelnen Materialflussmodelle. In diesem Kapitel wurde deshalb ein einheitliches Modellierungskonzept für das GMM auf Basis von Blockschaltbildern hergeleitet. Die Modellbausteine sind zum universellen Einsatz für Simulationsläufe mit kinetischer und kinematischer Kollisionsauflösung entworfen worden. Für einzelne Teilmodelle ist es weiterhin möglich, diese beliebig zu skalieren.

Kapitel 8

Realisierung und Anwendung

Das in den vorangegangenen Kapiteln entwickelte GMM mit kinematischer Kollisionsauflösung und kinetischer Kollisionsauflösung soll abschließend einer realen Problemstellung aus der Materialflusstechnik gegenübergestellt werden.

Die repräsentative Realisierung gliedert sich in zwei Aufgaben:

- Die Implementierung des computerrechenbaren Simulationsmodells im Echtzeitteil des Simulationswerkzeugs,
- Der Vergleich der Modellerstellungszeit gegenüber dem Stand der Technik und
- Die Bewertung der Berechnungseigenschaften.

Zunächst wird die Umsetzung des computerrechenbaren Simulationsmodells kurz skizziert.

Im Beispiel werden die realzeitdeterministischen Berechnungseigenschaften sowie die erreichbare Genauigkeit mit einer kinematischen und kinetischen Kollisionsauflösung detailliert betrachtet. Ausgehend von einer Beschreibung des technischen Systems wird dazu eine geeignete funktionale Zerlegung des Gesamtsystems in Subsysteme vorgenommen. Diese werden dann nach der Vorgehensweise für das GMM modelliert. Ein- und Ausgangssignale zur Materialflussteuerung werden definiert und die entsprechenden Verbindungen in der blockschaltbildbasierten Modellierungsoberfläche von Aktor- und Messsystemen mit den Materialflusselementen hergestellt. An einem typischen Auslagerungsvorgang durch ein Regalbediengerät werden die Berechnungseigenschaften bewertet.

8.1 Computerrechenbares Simulationsmodell

Die Umsetzung des computerrechenbaren Simulationsmodells erfolgt im Simulationswerkzeug ISG-virtuos (siehe auch Kapitel 11.1). Die Berechnung des GMMs mit kinematischer

Kollisionsauflösung erfolgt im Echtzeitteil der Software, die Berechnung des GMMs mit kinetischer Kollisionsauflösung im Nicht-Echtzeitteil.

Für die Realisierung des computerrechenbaren Simulationsmodells mit kinematischer Kollisionsauflösung wurde der Echtzeitteil des ursprünglichen Simulationswerkzeugs um mehrere Basisbibliotheken, eine Technologiebibliothek und eine Modulbibliothek, der Materialflussbibliothek, erweitert (siehe Abbildung 44).

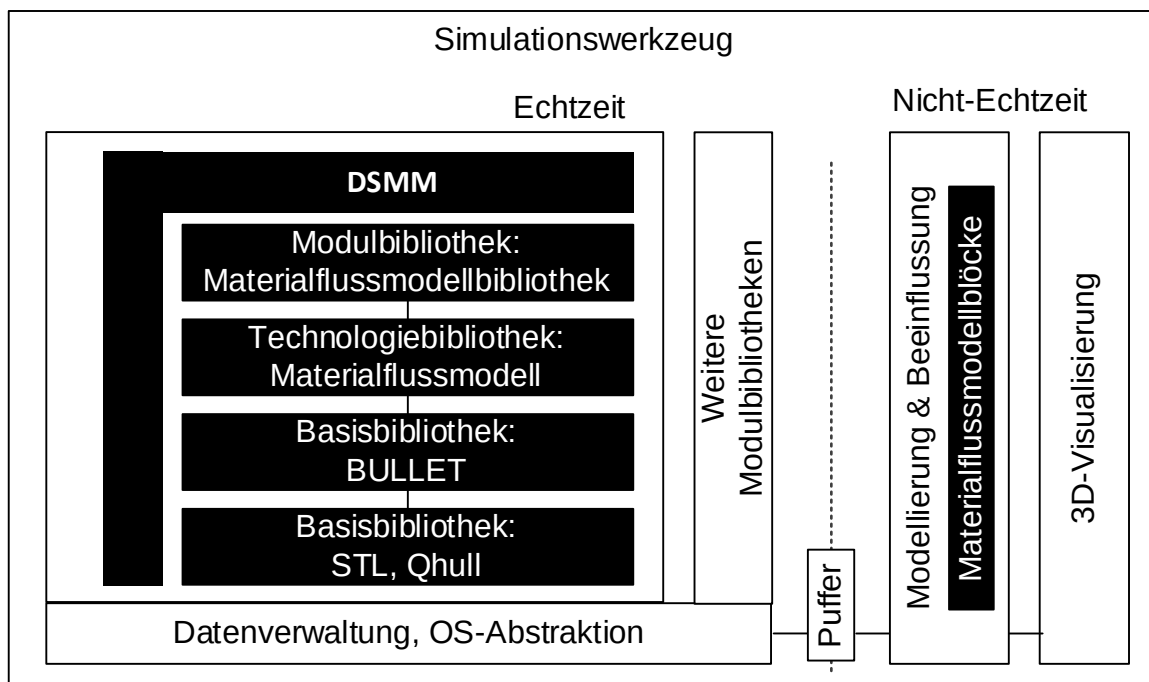


Abbildung 44: Konzept des erweiterten Simulationswerkzeugs mit dem computerrechenbaren Simulationsmodell und den Materialflussmodellblöcken

Die Basisbibliotheken Standard Template Library (STL), QHULL und die Kollisionserkennung BULLET sind lediglich Portierungen des Quellcodes auf die Betriebssystemerweiterung TwinCAT 2.11, also Anpassungen der Speicherverwaltung und der Betriebssystemabstraktion in den jeweiligen Bibliotheken. Ansonsten wurde der Original-Quellcode nicht verändert.

Die neuen Algorithmen für das GMM mit kinematischer Kollisionsauflösung wurden gemäß Kapitel 5 in der Technologiebibliothek „Materialflussmodell“ umgesetzt. Bei der Implemen-

tierung wurden rekursive Methoden für die Berechnung der Gelenke und des Kontaktgraphen genutzt. Für die Algorithmen des GMMs mit kinetischer Kollisionsauflösung wurde auf die Implementierung in BULLET zurückgegriffen.

Aufgrund der Modellierung im Nicht-Echtzeitteil muss der Quellcode jedes Materialflusselements im Echtzeitteil ein speziell definiertes Format mit zuvor festgelegten Ein- und Ausgängen aufweisen. Diese Vorgaben wurden in der obersten Modulbibliothek „Materialflussmodellbibliothek“ umgesetzt.

8.2 Hochregallagersystem als Vergleichsbasis

Beispielhaft soll im Folgenden ein Hochregallagersystem genauer betrachtet werden (vgl. Abbildung 45). Es setzt sich aus einem 7-zeiligen Hochregallager mit je 8 Lagerplätzen pro Zeile, einem Lagerregalbediengerät, einem Stetigförderer mit Eckumsetzer und einem Umwerfer zum Wenden der Kisten zusammen.

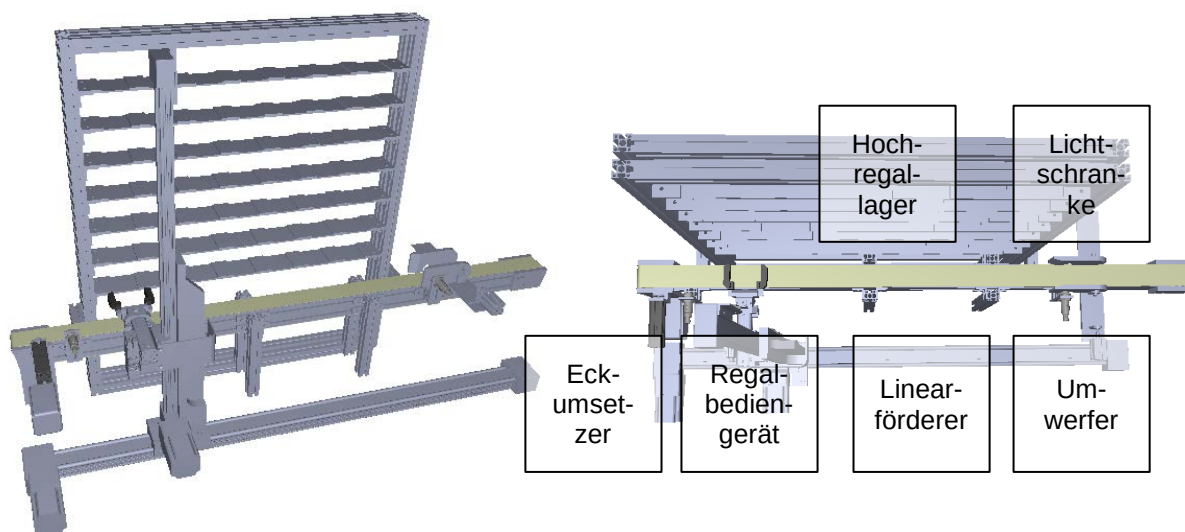


Abbildung 45: Perspektivische Seitenansicht und Draufsicht des Hochregallagers

Die horizontale und vertikale Achse des Regalbediengeräts werden über Schrittmotoren bewegt und mit einer NC-Steuerung geregelt. Als Stellgröße wird die Soll-Geschwindigkeiten der Achsen vorgegeben und über Sensoren die Ist-Position zurückgegeben. Sowohl die Vorschubbewegung und die Backenbewegung des Greifers, als auch der Umwerfer sind

pneumatisch gesteuert. Als Stellgröße dient ein An-/Aussignal. Eine Rückmeldung an das Steuerungssystem erfolgt nicht.

Vor dem Eckumsetzer und dem Umwerfer ist für das Erkennen von Stückgütern jeweils eine Lichtschranke angebracht. Sobald ein Stückgut detektiert wurde, wird die entsprechende Steuerungssequenz für die Materialflusselemente gestartet. Anhand der vergangenen Zeit ab der Detektion eines Stückguts werden die Stellgrößen für die Materialflusselemente berechnet.

8.3 Vergleich der Modellierung des GMMs mit dem Stand der Technik

Im Folgenden wird nun die Modellerstellungszeit des GMMs mit der Modellerstellungszeit eines kinetischen und kinematischen Materialflussmodells nach dem Stand der Technik verglichen.

8.3.1 Blockschaltbildbasierte Modellierung mit dem GMM

Das Modell des Hochregallagers wurde in dem Modellierungswerkzeug modular aufgebaut. Die einzelnen Materialflusselemente sind auf der obersten Ebene in verschiedene Subsysteme unterteilt (vgl. Abbildung 46).

In dem GMM werden keine Transitionsbedingungen für den Übergang des Stückguts von einem Materialflusselement zum anderen benötigt. Deshalb bestehen zwischen den einzelnen Subsystemen auch keine weiteren Abhängigkeiten. Die Übergabe erfolgt wie in der Realität anhand der geometrischen 3D-Objektbeschreibung und deren -eigenschaften.

Im Stückgutvorratsspeicher ist ein Parameter vorgesehen, der die Auswahl der kinematischen Kollisionsauflösung oder einer kinetischen Kollisionsauflösung für einen Simulationslauf ermöglicht.

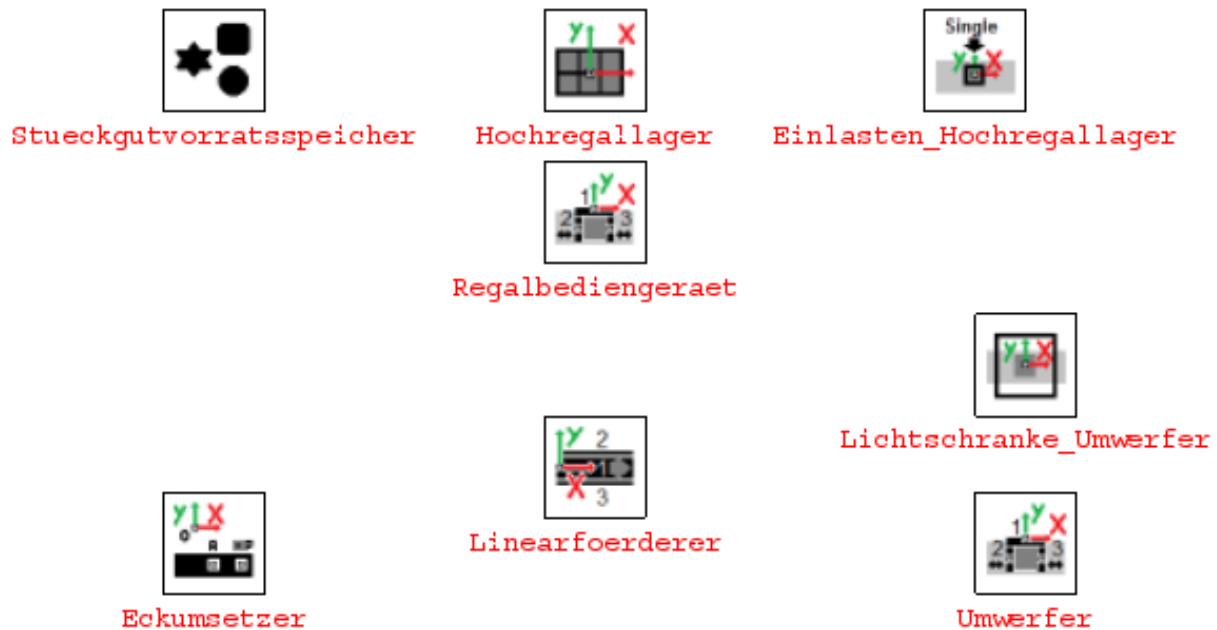


Abbildung 46: Modellierung des Hochregallagers in dem blockschaltbildbasierten Modellierungswerkzeug mit dem GMM. Die einzelnen Materialflusselemente wurden in verschiedenen Subsystemen modelliert.

In Abbildung 47 ist die konkrete Realisierung des Subsystems „Regalbediengerät“ mit dem GMM dargestellt. Zwei „Serielle Achse“-Bausteine sind seriell mit einem „Greifer“-Baustein verknüpft. Zur Bewegungserzeugung dienen 2 Aktorsysteme. Gemessen wird mit 5 Messsystemen, die mit den Materialflusselementen verknüpft sind. An diesen sind die Stellsignale und Messsignale des realen Steuerungssystems verknüpft.

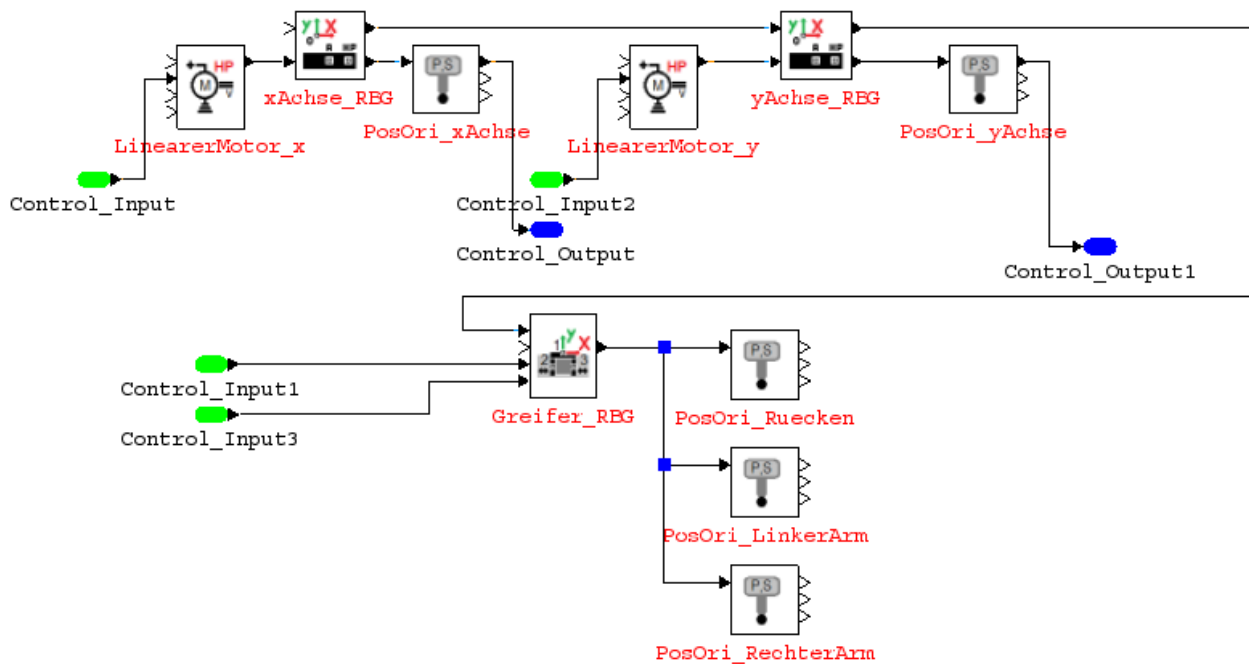


Abbildung 47: Modellierung des Subsystems Regalbediengerät mit dem gekoppelten Materialflusssystem inkl. der Verknüpfungen zum Steuerungssystem

Über die Parametermasken der jeweiligen Materialflusselement-Bausteine werden die geometrischen 3D-Objektbeschreibungen, die Position und Orientierung und der Reibparameter festgelegt (vgl. Abbildung 62).

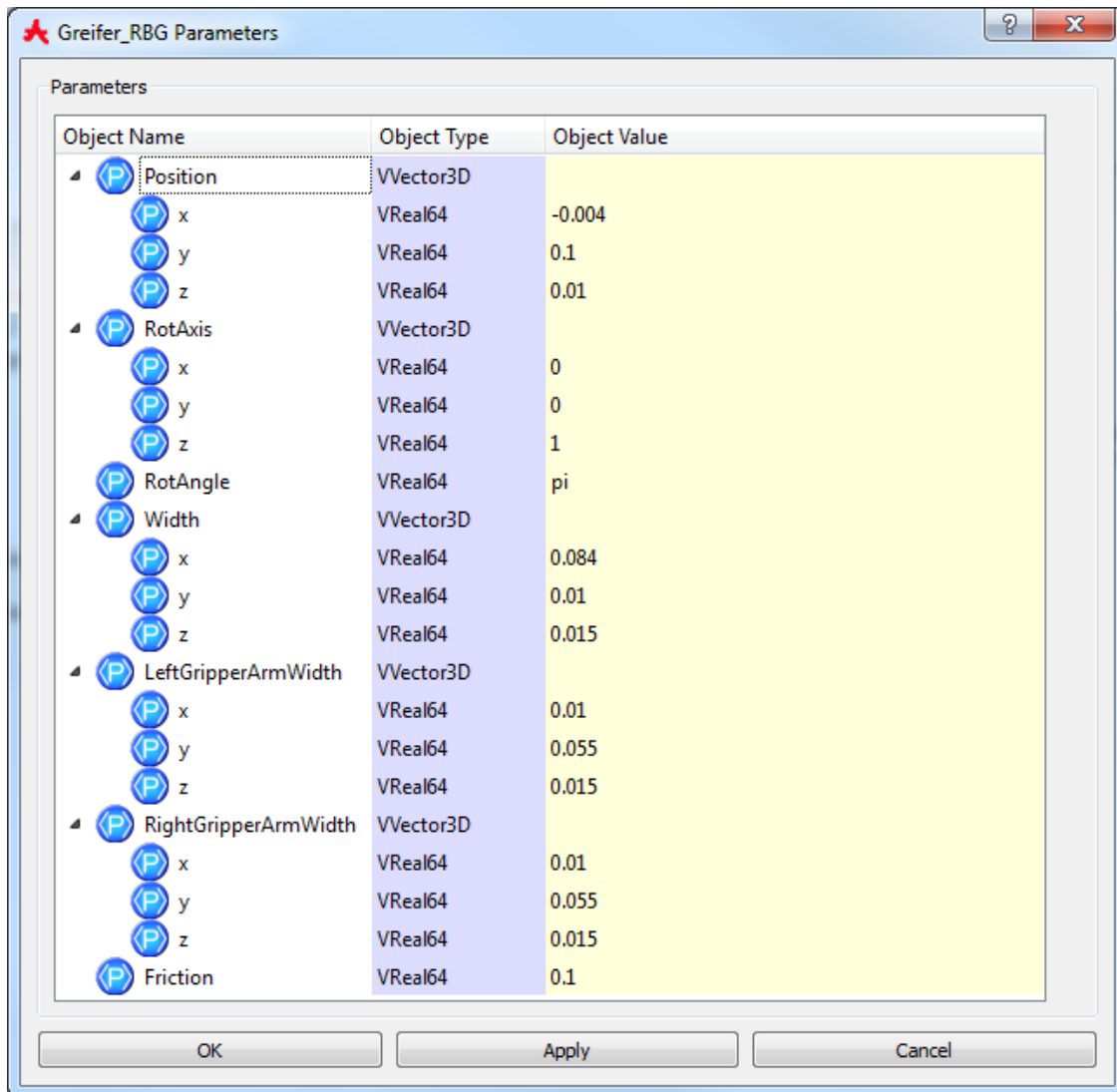


Abbildung 48: Parametermaske des Greifer-Bausteins

8.3.2 Blockschaltbildbasierte Modellierung nach dem Stand der Technik

In Abbildung 49 ist die oberste Ebene des Hochregallagers mit dem kinematischen Materialflusssystem nach dem Stand der Technik dargestellt. Da zwischen den einzelnen Materialflusselementen gemeinsame Knoten für die Zuordnung des Stückguts benötigt werden, besteht auch zwischen den einzelnen Subsystemen der Materialflusselemente eine starke Abhängigkeit, die hier in Form von Verbindungslinien modelliert wird. Die Anbindung an den Wareneingang und das Bearbeiten erfordert weitere Verbindungen, die über die Linien am

rechten und linken Rand angedeutet sind. Während es bei dem GMM möglich war, die Subsysteme entsprechend der räumlichen Anordnung des realen Hochregallagers vorzunehmen, ist dies aufgrund der Verbindungen zwischen den Subsystemen kaum möglich.

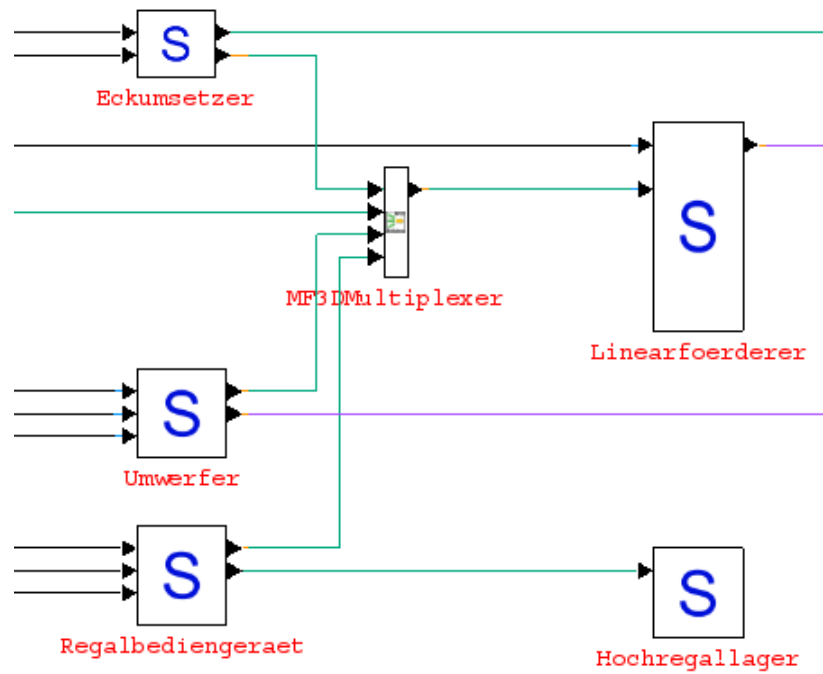


Abbildung 49: Modellierung des Hochregallagers in dem blockschaltbildbasierten Modellierungswerkzeug mit einem kinematischen Materialflussmodell nach dem Stand der Technik. Die einzelnen Materialflusselemente wurden in verschiedenen Subsystemen modelliert.

In derzeitigen Systemen muss das kinematischen Materialflussmodell des Regalbediengerätes wie in Abbildung 50 dargestellt modelliert werden. Für den Übergang zwischen den Materialflusselementen werden Knoten definiert und die entsprechenden Transitionsbedingungen modelliert. Deshalb werden zusätzliche Knoten-Bausteine benötigt und weitere Bausteine für das Festlegen der Transitionsbedingungen. Es werden also deutlich mehr Bausteine als mit einem GMM benötigt werden. Weiterhin kommt erschwerend hinzu, dass die richtigen Transitionsbedingungen aufwändig zu modellieren sind.

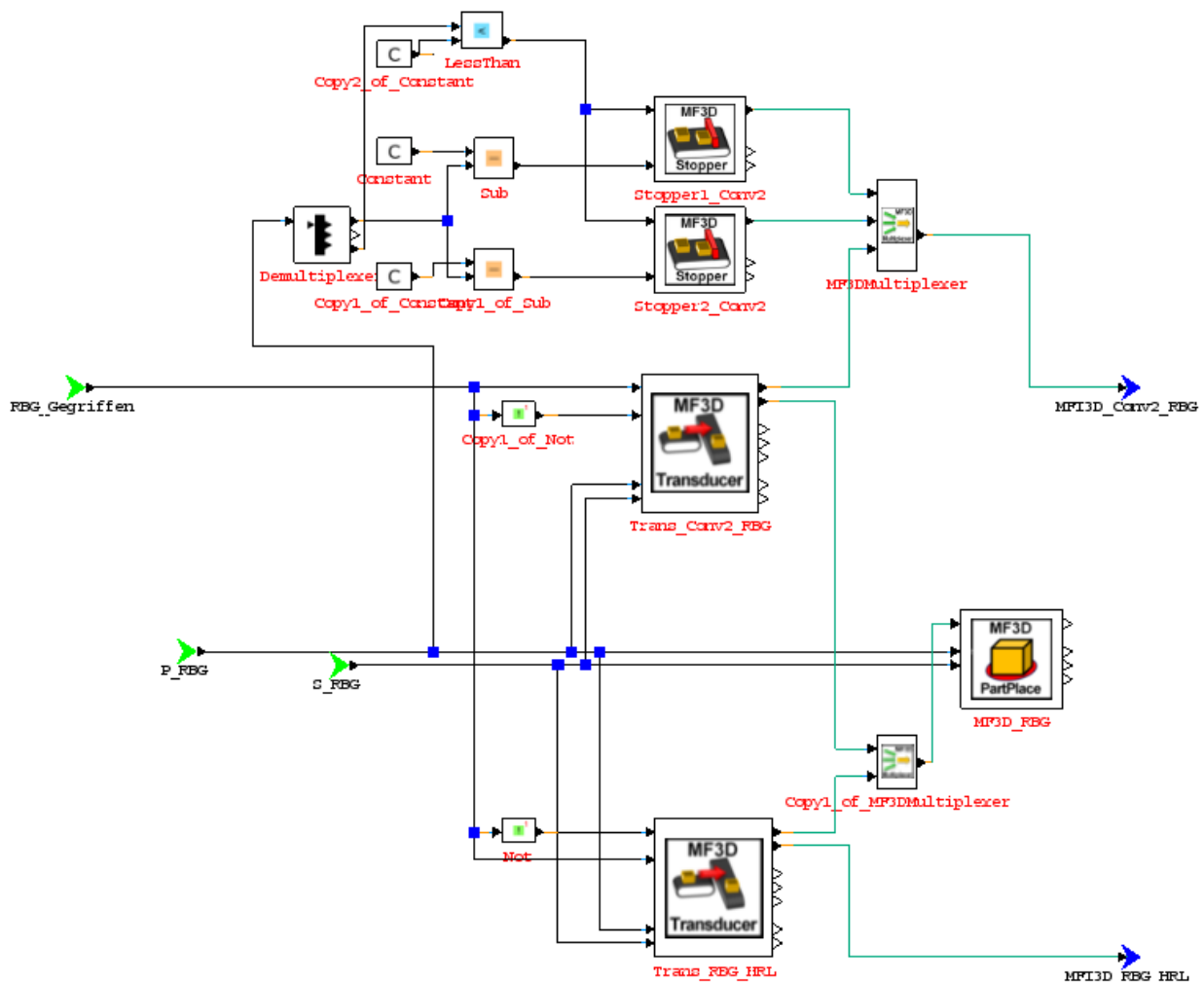


Abbildung 50: Modellierung des Subsystems „Regalbediengerät“ mit dem kinematischen Materialflusssystem nach dem Stand der Technik

Da zwischen den Materialflusselementen keine Knoten modelliert werden müssen, können einzelne Bereiche des GMMs jederzeit beliebig skaliert werden, ohne das Gesamtmodell negativ zu beeinflussen.

8.3.3 Zusammenfassung

Die Modellerstellung wurde mit einem kinematischen Materialflussmodell nach dem Stand der Technik verglichen, wobei sich schon dabei eine deutliche Zeitersparnis aufgrund der nicht notwendigen Transitionsbedingungen ergab. Da es zwischen den Materialflusselementen keine Modellabhängigkeiten mehr gibt, konnten diese Modellbausteine analog zu

den realen Elementen angeordnet werden. Der Wechsel zwischen kinematischer und kinetischer Kollisionsauflösung wurde über ein Parameter-Flag realisiert. Das GMM kann folglich über den gesamten Entwicklungsprozess eingesetzt werden, wodurch sich eine deutliche Zeitersparnis ergibt.

8.4 Bewertung des gekoppelten Materialflussmodells

In Simulationsläufen mit der kinematischen Kollisionsauflösung und kinetischen Kollisionsauflösung des GMMs werden die Genauigkeit, die Robustheit, der Realzeitdeterminismus, die Berechnungsdauer und der Zeitdeterminismus analysiert und bewertet. Die kinetische Kollisionsauflösung im GMM kann unverändert – wie im Stand der Technik dargestellt – erfolgen. Die Genauigkeit und die Echtzeiteigenschaften wurden bereits eingehend untersucht. (Wünsch 2007), (Spitzweg 2009), (Lacour 2012) Die detaillierte Bewertung beschränkt sich im Folgenden auf das **GMM mit der kinematischen Kollisionsauflösung**. Exemplarisch wird auch ein Simulationslauf mit kinetischer Kollisionsauflösung durchgeführt, der für die Bewertung des GMMs herangezogen wird.

8.4.1 Experiment

Die zuvor erarbeiteten Lösungsansätze werden in einem Experiment überprüft. Dafür werden nach 0.1 s in dem Hochregallager parallel 64 Stückgüter eingelastet. In vertikaler Richtung sind diese geringfügig nach oben versetzt, so dass das Stückgut zunächst durch die Gravitation auf die Lagerzeilen fällt. Nach der Kollision mit der Lagerzeile soll das Stückgut im Lager deponiert werden, d. h. die Kollisionsauflösung deaktiviert sich automatisch, um Rechenzeit zu sparen.

Dann beginnt ein Auslagerungsvorgang mit dem Regalbediengerät. Dafür wird mit dem Greifer ein Stückgut in der zweitobersten Lagerzeile angefahren und nach 5 s gegriffen. Zuletzt wird dieses auf dem Linearförderer abgelegt.

Weiterhin wird bei 0.1 s ebenfalls ein Stückgut auf den Linearförderer in Nähe des Umwerfers eingelastet. Nach 9 s wird das Stückgut am Umwerfer geklemmt, gewendet und auf dem Linearförderer abgelegt.

Der Simulationslauf wird zusätzlich mit einem fehlerhaften Steuerungsprogramm wiederholt. Zum einen wird die Klemmung des Umwerfers zu früh geöffnet, zum anderen wird Stückgut über das Ende des Förderbands hinaus transportiert.

Die Simulationsschrittweite beträgt 10 ms.

In Tabelle 15 sind die benötigten Materialflusselemente und die benötigten 3D-Objektbeschreibungen gelistet. Es werden 81 Materialflusselemente mit insgesamt 160 3D-Objektbeschreibungen in dem GMM initialisiert.

Tabelle 15: Benötigte Materialflusselemente und Anzahl an notwendigen 3D-Objektbeschreibungen pro Materialflusselement für den Simulationslauf mit dem GMM

Materialflusselement	Vorkommen	Anzahl an notwendigen 3D-Objektbeschreibungen pro Materialflusselement
Achse	3	1
Bereichssensor	2	1
Lagertechnik	7	1
Linearförderer	1	2
Greifer	2	3
Einlasten	65	1
Stückgutvorratsspeicher	1	75

8.4.2 Ausreichende Genauigkeit

In Abbildung 51 ist die 3D-Visualisierung mit CAD-Daten des Hochregallagers dargestellt. Die vereinfachte 3D-Objektbeschreibung, die bei den Simulationsläufen mit dem GMM verwendet wird, ist daneben abgebildet.

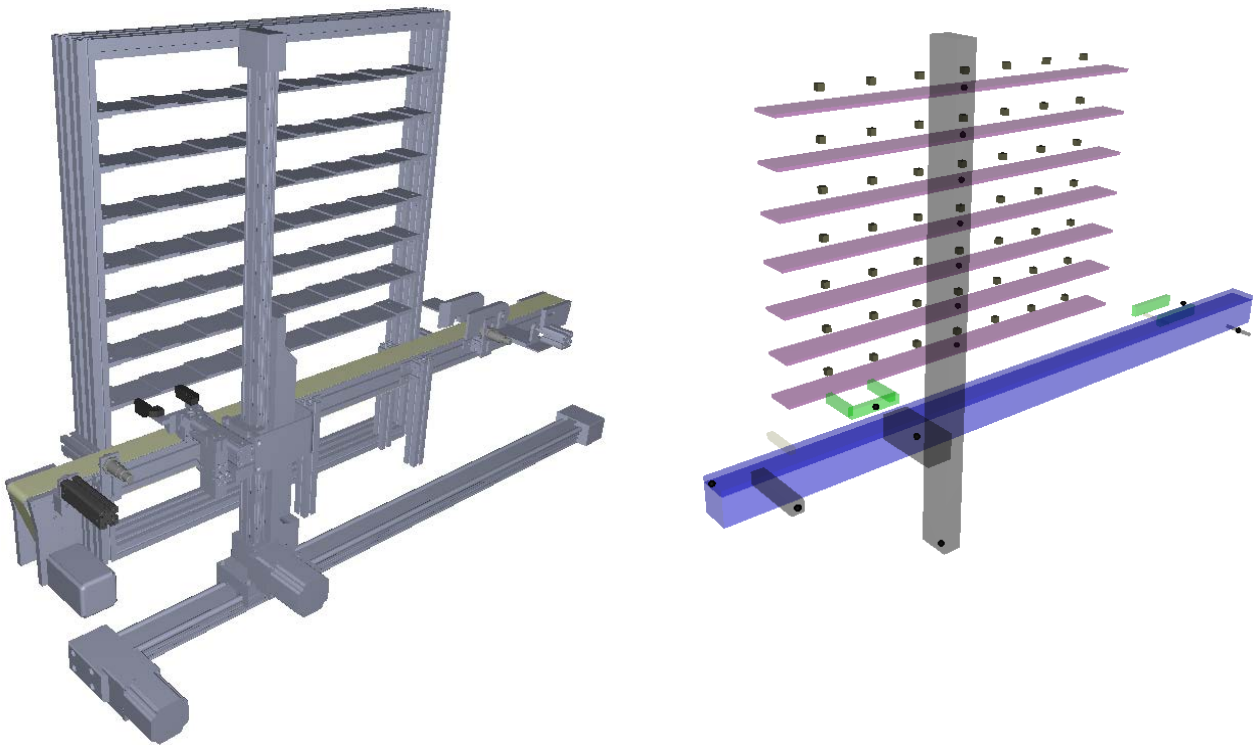


Abbildung 51: 3D-Visualisierung des Hochregallagers mit hochauflösenden CAD-Daten (links) und die vereinfachte 3D-Objektbeschreibung des Hochregallagers im GMM (rechts)

In Abbildung 52 sind zwei Screenshots während des Simulationslaufs mit dem GMMs mit kinematischer Kollisionsauflösung dargestellt. Bei dem Simulationslauf wurden die vereinfachten quadratischen 3D-Objektbeschreibungen angewendet.

Im linken Screenshot wird ein Stückgut mit dem Regalbediengerät aus dem Hochregallager gegriffen. Alle Stückgüter wurden bereits deponiert und sind deshalb rot und halbtransparent eingefärbt. Durch den Greifvorgang wird die kinematische Kollisionsauflösung des eingelagerten Stückguts automatisch wieder aktiviert. Dies wird durch die blaue Einfärbung des Stückguts visualisiert. Der Greifvorgang wird korrekt wiedergegeben.

Im rechten Screenshot ist der Umwerfvorgang dargestellt. Zunächst wird das Stückgut gegriffen und dann um die Drehachse des Umwerfers rotiert. Auch bei diesem Szenario wird eine ausreichende Genauigkeit erreicht.

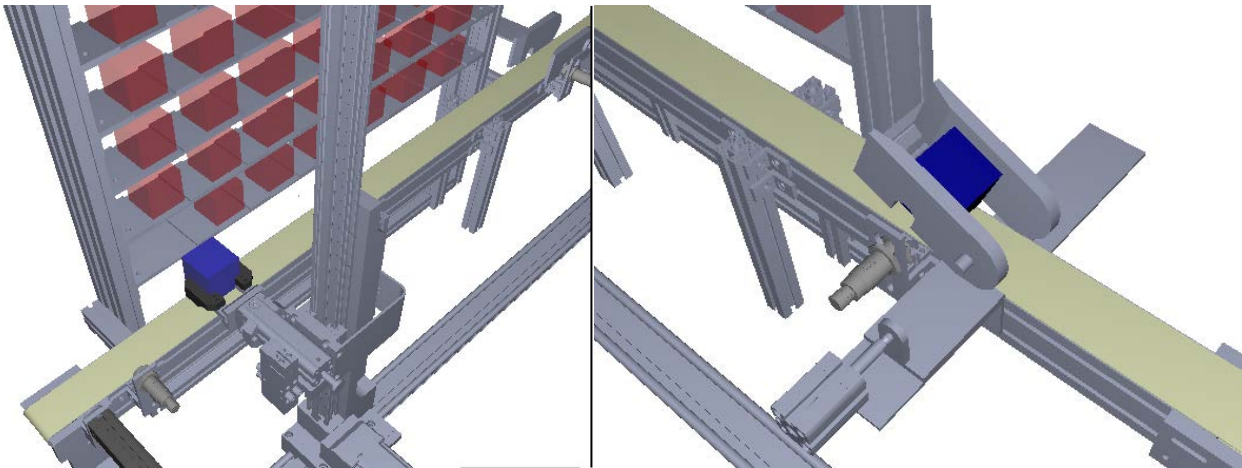


Abbildung 52: Zwei Screenshots während des Simulationslaufs mit dem GMM mit kinematischer Kollisionsauflösung. Im linken Screenshot ist das Greifen des Stückguts durch das Regalbediengerät dargestellt, im rechten ein Umwerfvorgang.

Solange die Steuerungsprogramme fehlerfrei abgearbeitet wurden, konnte bei keinem Simulationslauf ein ungewöhnliches Verhalten in der Materialbewegung entdeckt werden. Durch die grafische Animation konnte überprüft werden, dass die erwartete Funktionalität des Materialflusses im Hochregallager zutrifft.

In der Realisierungsphase wird die ausreichende Genauigkeit gegebenenfalls nicht erreicht. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 53 durch zwei Screenshots mit fehlerhaften Steuerungsprogrammen deutlich.

Im linken Screenshot öffnet das Steuerungsprogramm die Backen des Greifers bevor der Umwerfvorgang vollständig abgeschlossen ist. Das Stückgut fällt zunächst durch die Gravitation auf das Förderband zurück. Allerdings wird nun das Stückgut nicht zur Kontaktfläche rotiert, sondern bleibt mit seiner aktuellen Orientierung liegen. Dieser Effekt tritt auf, da in der kinematischen Kollisionsauflösung keine Orientierungsvorgabe erfolgt.

Im rechten Screenshot wird das Stückgut aufgrund eines fehlerhaften Steuerungsprogrammes über die Bandlänge des Linearförderers hinausbewegt. Zwar fällt das Stückgut vom Band des Förderers, allerdings erst sobald das Stückgut das Band vollständig verlassen hat. Bei einem realitätsgetreuen Abbild würde das Stückgut bereits dann vom Band fallen, wenn der Masseschwerpunkt über das Band hinausragt. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen,

dass die kinematischen Impulse immer im Masseschwerpunkt des Objektes erfolgen und nicht im Kollisionspunkt.

Beide Effekte können mit einem GMM mit kinetischer Kollisionsauflösung problemlos abgebildet werden. Dann ist auch die ausreichende Genauigkeit in der Realisierungsphase gegeben. Das GMM hat also für alle Entwicklungsphasen eine ausreichende Genauigkeit.

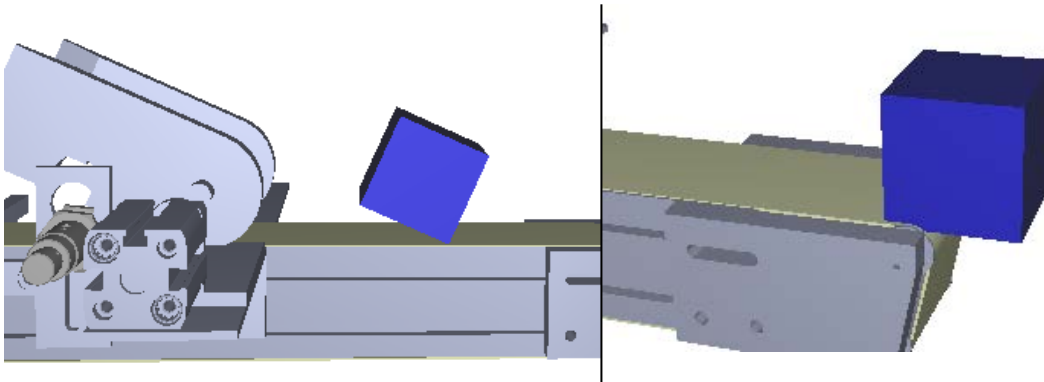


Abbildung 53: Zwei weitere Screenshots während des Simulationslaufs mit dem GMM mit kinematischer Kollisionsauflösung mit fehlerhaften Steuerungsprogrammen. Eine ausreichende Genauigkeit ist bei einer kinematischen Kollisionsauflösung und fehlerhaften Steuerungsprogrammen nicht mehr gegeben.

8.4.3 Robustheit

Alle Simulationsläufe mit kinematischer Kollisionsauflösung konnten problemlos in der Echtzeitbetriebssystemerweiterung TwinCAT durchgeführt werden. Auch bei der Ausführung der kinetischen Kollisionsauflösung im Nicht-Echtzeitteil wurden keine Probleme festgestellt. Die Robustheit des GMMs ist gegeben.

8.4.4 Speichermanagement

Für den Simulationslauf mit der kinematischen Kollisionsauflösung wurde ein initialer Speicherbedarf von knapp 2 MB gemessen. Dies deckt sich mit dem prognostizierten Speicherplatzbedarf aus den Kapiteln 5.4 und 6.4. Zur Laufzeit wird kein dynamischer Laufzeitspeicher allokiert. Die Messergebnisse bestätigen das Realzeit-Speichermanagement des GMMs mit kinematischer Kollisionsauflösung.

Bei dem Simulationslauf mit kinetischer Kollisionsauflösung wurde ein initialer Speicheraufwand von gut 4 MB ermittelt. Während der Simulationsschritte wurde zur Ermittlung der Kollisionsauflösung zusätzlich dynamischer Speicher allokiert, der am Ende jedes Simulationsschrittes wieder freigegeben wurde. Je nach Simulationssituation wurden bis zu knapp 8 MB benötigt. Wie zu erwarten war, ist das GMM mit kinetischer Kollisionsauflösung für realzeitdeterministische Simulationsläufe ungeeignet.

Tabelle 16: Bewertung des Speicherbedarfs für das GMM

Eigenschaft	GMM	
	Kinematische Kollisionsauflösung	Kinetische Kollisionsauflösung
Initialer Speicherbedarf [KB]	1973	4198
Dynamischer Laufzeitspeicher je Simulationsschritt [KB]	0	18 bis 7759
Realzeit-Speichermanagement	+	–

+: Erfüllt; o: Ausreichend erfüllt; –: Nicht erfüllt

8.4.5 Berechnungsdauer und Zeitdeterminismus

Die Messung in Abbildung 54 zeigt die Berechnungsdauer des Simulationslaufs pro Simulationsschritt aufgetragen über der Simulationszeit. Bei 0.1 s gibt es einen deutlichen Anstieg in der Berechnungsdauer. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass die 64 Stückgüter zeitgleich eingelastet werden und dann kurzzeitig durch die Gravitation bewegt werden, bevor diese dann im Hochregallager deponiert werden. Während bei der kinematischen Kollisionsauflösung der stationäre Zustand bereits nach einem Simulationsschritt erreicht ist dauert dies bei einer kinematischen Kollisionsauflösung mehrere Sekunden. Dementsprechend sinkt die Berechnungsdauer auch erst später.

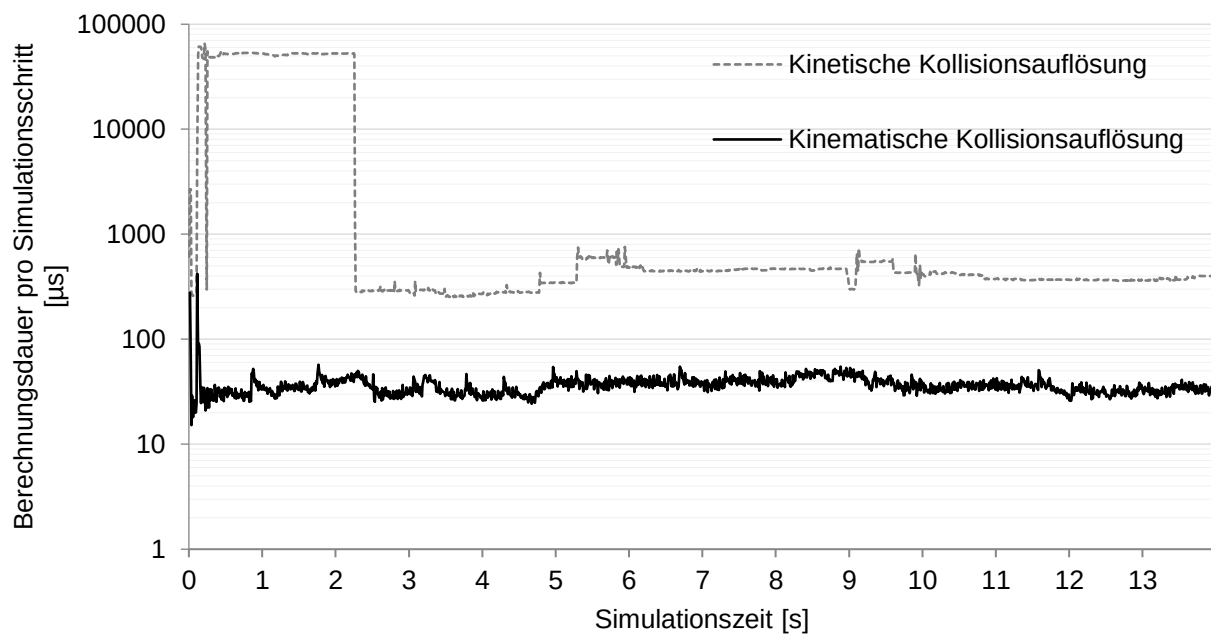


Abbildung 54: Berechnungsdauer mit dem GMM pro Simulationsschritt [μs] aufgetragen über der Simulationszeit [s]

Wie bereits die Analyse der Zeitkomplexität in den Kapiteln 5.4 und 6.4 ergab, hat die Anzahl der bewegten Objekte einen signifikanten Anteil an der Berechnungsdauer der kinematischen Kollisionsauflösung. Dieser Effekt spiegelt sich auch in der Messung wieder. Beim Einlasten der 65 Stückgüter steigt die Berechnungsdauer auf knapp 500 μs. Ansonsten gibt es bei der kinematischen Kollisionsauflösung keinen weiteren erwähnenswerten Anstieg der Berechnungsdauer, welche nahezu konstant bei rund 50 μs liegt.

Ein recht ähnliches Bild zeichnet sich auch dem Simulationslauf mit der kinetischen Kollisionsauflösung wieder. Allerdings liegt hier die Berechnungsdauer, um einen Faktor 10 bis 100, deutlich höher. Nach dem Einlasten der 64 Stückgüter beträgt die Berechnungsdauer bis zu 65 ms. In diesem Fall ist nicht einmal mehr der durchschnittliche Determinismus erfüllt, da die Simulationsschrittweite 10 ms beträgt. Demzufolge ist für dieses Szenario kein Simulationslauf in Echtzeit möglich. Auch beim Greifen des Stückguts bzw. beim Klemmen des Stückguts mit dem Umwerfer ist bei der kinetischen Kollisionsauflösung jeweils ein deutlicher Berechnungsanstieg um mehr als 300 μs zu verzeichnen.

Die Simulationsläufe mit der kinematischen und kinetischen Kollisionsauflösung weisen beide ein zeitdeterministisches Verhalten auf. Allerdings ist die Berechnungsdauer mit kinetischer Kollisionsauflösung signifikant höher und kann dann teilweise nicht mehr das Kriterium für die Echtzeit-Simulation erfüllen.

8.4.6 Zusammenfassung

Für das Experiment konnten die Simulationsläufe mit dem GMM mit kinematischer und kinetischer Kollisionsauflösung problemlos durchgeführt werden. Die Ausführung der kinematischen Kollisionsauflösung erfolgte im Echtzeitteil, die Ausführung der kinetischen Kollisionsauflösung im Nicht-Echtzeitteil. Die Robustheit war während der Simulationsläufe gegeben.

Unterschiede ergaben sich bei der Genauigkeit, dem Speichermanagement, der Berechnungsdauer und dem Zeitdeterminismus. Während bei einer kinematischen Kollisionsauflösung die ausreichende Genauigkeit insbesondere bei fehlerhaften Steuerungsprogrammen nicht mehr gegeben ist, erfüllt dieses zu jedem Zeitpunkt alle Anforderungen an den Realzeitdeterminismus.

Die kinetische Kollisionsauflösung lieferte dagegen in jeder Situation hochgenaue Simulationsergebnisse. Allerdings kam es während der Simulationsschritte zu dynamischen Speicherallokationen im Bereich von mehreren Megabyte und einem so signifikanten Anstieg der Berechnungsdauer, dass teilweise nicht einmal mehr das Kriterium für die Echtzeitsimulation erfüllt ist.

Diese Erkenntnisse bestätigen erneut das Vorgehen zur Kombination der kinematischen und kinetischen Materialflussmodelle in einem GMM mit kinematischer und kinetischer Kollisionsauflösung. Über den Entwicklungsprozess kann nun durchgängig zwischen den beiden Simulationsansätzen gewechselt werden, ohne eine Neumodellierung vorzunehmen. Entsprechend der konkreten Problemstellung in der Entwicklungsphase kann dann der ideale Simulationsansatz gewählt und skaliert werden. Dabei vorgenommen Änderungen am Materialflussmodell sind immer für beide Simulationssätze verfügbar.

Kapitel 9

Zusammenfassung

Der Transport und die Lagerung innerhalb einer Fertigungseinrichtung verursachen einen erheblichen Anteil an den Materialfluss- und Logistikkosten und damit an den Selbstkosten eines Produktes. Die Anforderungen an die Materialflussteuerung haben dabei ein hohes Ausmaß an Komplexität erreicht. Die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß von Steuerungssystemausfällen durch Softwarefehler stellen ein dominierendes Problem im innerbetrieblichen Materialfluss dar.

Ein Handlungsbedarf ergibt hieraus für die Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen. Mittels individuellen und problemspezifischen Materialflusssimulationen kann die Entwicklung der Steuerung abgesichert werden. Nachteil ist der hohe Zeitaufwand für die Erstellung der jeweiligen Materialflussmodelle, sowie der Nachweis der Modellvalidität.

Durch die Zusammenführung der jeweiligen Materialflussmodelle in einem **gekoppelten Materialflussmodell** (GMM) kann diese Problemstellung aufgelöst werden. Teilmodelle im GMM können entsprechend den Anforderungen angepasst und verfeinert werden. Die Durchgängigkeit gewährleistet den Einsatz des GMM über allen Entwicklungsphasen.

Die Arbeit zeigt hierzu die simulationstechnischen, datentechnischen und systemtechnischen Anforderungen auf und beschreibt die kinematischen und kinetischen Materialflussmodelle zur Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen. Danach wird deren Einsatz über den Entwicklungsprozess erläutert. Aufgrund der verschiedenen Anforderungen in den Entwicklungsphasen wird zwischen den Materialflussmodellen gewechselt. Daraus ergibt sich die Forderung nach einem gekoppelten Materialflussmodell.

Aus der Analyse des Stands der Technik werden nun die wesentlichen Anforderungen an ein gekoppeltes Materialflussmodell zur Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen bestimmt: Die Wiederverwendbarkeit der Modelle, realzeitdeterministische Berechnungseigenschaften und ein einheitliches Modellierungskonzept.

Zunächst wird die Wiederverwendbarkeit im GMM erläutert, wobei hier die einheitliche Modellbasis den zentralen technischen Lösungsansatz darstellt. Dies wird gemäß der Anforderungsanalyse mittels einer integrativ gekoppelten Modellbasis erreicht. Der Vorteil ist, dass daraus ein einheitliches Modellierungskonzept ohne Transitionsbedingungen abgeleitet werden kann. Um der Durchgängigkeit gerecht zu werden, weist das entworfene kinematische Teilmodell im GMM realzeitdeterministische Berechnungseigenschaften auf.

Die Umschaltung zwischen kinematischen und kinetischen Materialflussmodell im GMM kann jederzeit erfolgen. Dies wird durch die impulsbasierte Kollisionsauflösung im GMM erreicht, wofür kinematische und kinetische Impulse beschrieben werden. Die impulsbasierte kinetische Kollisionsauflösung erfolgt dabei nach dem Stand der Technik. Für die kinematische Kollisionsauflösung wurden verschiedene Vereinfachungen formuliert und entsprechende kinematische Impulse abgeleitet. Damit steht für die Entwicklungsunterstützung von Materialflusssteuerungen erstmals ein gekoppeltes Materialflussmodell zur Verfügung, mit dem bedarfsgerecht kinetische und kinematische Simulationsläufe durchgeführt werden können, ohne eine Neumodellierung durchführen zu müssen.

Die Kollisionserkennung, die ein zentrales Element des computerrechenbaren Simulationsmodells darstellt, wurde zunächst nicht berücksichtigt und erst nachfolgend gesondert besprochen. Die Kollisionserkennung besteht in dieser Arbeit aus einer Kollisionsprüfung zur Ermittlung der benötigten Kontaktinformationen, einem Priorisierungsverfahren und einem Hüllkörperverfahren. Da in anderen Domänen, wie beispielsweise Computerspielen, bereits zahlreiche Kollisionserkennungen realisiert wurden, sind zunächst die Unterscheidungsmerkmale und Anforderungen für ein GMM herausgearbeitet. Daraufhin werden verschiedene Realisierungen ausgewählt, die für das GMM geeignet sein können. Verschiedene Experimente und deren konstruktiver und experimenteller Bewertung zeigen, dass durch eine Kombination aus vorhandenen Implementierungen eine realzeitdeterministische Kollisionserkennung möglich ist.

Der Handlungsbedarf in dieser Arbeit ergab sich insbesondere durch den hohen Modellerstellungsaufwand für die einzelnen Materialflussmodelle aufgrund der heterogenen Modellierungskonzepte. Deshalb wird ein einheitliches Modellierungskonzept für das GMM auf Basis von Blockschaltbildern hergeleitet. Die Modellbausteine sind zum universellen Einsatz

für Simulationsläufe mit kinetischer und kinematischer Kollisionsauflösung konzipiert. Einzelne Teilmodelle können dabei beliebig skaliert werden.

Zuletzt wurde das GMM implementiert und exemplarisch ein Simulationslauf mit einem Hochregallagersystem, bestehend aus Fördertechnik, Lagertechnik und Handhabung, durchgeführt.

Die Modellerstellungszeit wird mit einem kinematischen Materialflussmodell nach dem Stand der Technik verglichen, wobei sich schon dabei eine deutliche Zeitersparnis aufgrund der fehlenden Transitionsbedingungen ergibt. Da das GMM durchgängig über den gesamten Entwicklungsprozess eingesetzt werden kann, liegt die Zeitersparnis noch deutlich höher, da eine erneute Modellierung für das kinematische Materialflussmodell entfällt.

Die Bewertung des Simulationslaufs zeigt, dass mit dem GMM weiterhin die notwendigen Simulationseigenschaften gegeben sind – bei einer deutlichen Reduzierung der Modellerstellungszeit.

Zu Beginn der Arbeit wurden fünf Hypothesen angeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass diese Thesen für die Realisierung eines GMMs Gültigkeit erlangen können:

- Die gängigen Materialflussmodelle zur Entwicklungsunterstützung von Materialflusssteuerungen können in einem gekoppelten Materialflussmodell zusammengefasst werden. Durch entsprechende Vereinfachungen kann eine gemeinsame Modellbasis mit einer impulsbasierten Kollisionsauflösung realisiert werden, wobei kinetische und kinematische Impulsen formuliert werden müssen.
- Das gekoppelte Materialflussmodell kann durchgängig über alle Entwicklungsphasen eingesetzt werden. Durch die konstruktive und experimentelle Vorgehensweise wurde die Genauigkeit des GMMs ermittelt und der Laufzeit- und Speicherplatzbedarf formalisiert. Das kinematische Materialflussmodell im GMM weist dabei realzeitdeterministische Berechnungseigenschaften auf. Dadurch werden mit dem GMM alle Entwicklungsphasen unterstützt.
- Durch die Anpassung des gekoppelten Materialflussmodells während der Entwicklungsphasen gehen keine simulationstechnischen Anforderungen des vorherigen Si-

mulationslaufs verloren. Dies konnte dadurch gelöst werden, dass in dem GMM jederzeit ein gesamtes Umschalten zwischen dem kinematischen und kinetischen Materialflussmodell möglich ist.

- Mit dem gekoppelten Materialflussmodell kann der Modellierungsaufwand gegenüber entwicklungsphasenspezifischen Materialflussmodellen in den Entwicklungsphasen reduziert werden, d. h. es ergibt sich ein Zeitersparnis über den gesamten Entwicklungsprozess. Der Vergleich der Modellerstellungszeit eines kinematischen Materialflussmodells des GMMs mit dem kinematischen Materialflussmodell nach dem Stand der Technik ergab eine deutlich niedrigere Modellerstellungszeit, bei einer deutlich höheren Übersichtlichkeit. Außerdem kann das GMM immer sowohl für kinetische als auch kinematische Simulationsläufe genutzt werden.
- Die Aussagekraft des gekoppelten Materialflussmodells ist mindestens genauso hoch wie die der bisherigen, individuellen und entwicklungsphasenspezifischen Materialflussmodelle. Bei der exemplarischen Anwendung eines Simulationslaufs des GMMs mit einem realen Hochregallager, konnten alle notwendigen Effekte zur Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen abgebildet werden.

Die Wirkung des GMMs ist folglich eine deutliche Reduzierung des Modellerstellungsaufwandes bei bleibender Modellvalidität über die unterschiedlichen Entwicklungsphasen von Materialflussteuerungen.

Kapitel 10

Literaturverzeichnis

- Aggteleky 1990** Aggteleky, Béla. 1990. *Fabrikplanung - Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung*.
Wien : Hanser.
ISBN 978-3-446-13207-8.
- Arnold 2006** Arnold, Dieter. 2006. *Intralogistik: Potentiale, Perspektiven, Prognosen*.
1. Aufl.
Berlin, Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-540-29657-7.
DOI: 10.1007/978-3-540-29658-4.
- Arnold et al. 2009** Arnold, Dieter & Furmans, Kai. 2009. *Materialfluss in Logistiksystemen*.
6. Auflage.
Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-642-01404-8.
DOI: 10.1007/978-3-642-01405-5.
- Bacs 2007** Bacs, Christian. 2007. *New Datahandling- and Rapid Virtual Prototyping Approach for Mechatronic Systems* : Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design, Paris, 28.-31.07.2007, S. 28-31.
ISBN 1-904670-02-4.
- Baraff 1996** Baraff, David. 1996. Linear-time dynamics using Lagrange multipliers.
In: Fujii, John (Hrsg.): *Proceedings of the 23rd annual conference on*

Computer graphics and interactive techniques.

New York : ACM Press, S. 137-146.

ISBN 0-89791-746-4.

DOI: 10.1145/237170.237226.

- Barzel et al. 1988** Barzel, Ronen & Barr, Alan H. 1988. A modeling system based on dynamic constraints.
In: Beach, Richard J. (Hrsg.): *Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques.* New York : ACM Press, S. 179-188.
ISBN 0-89791-275-6.
DOI: 10.1145/54852.378509.
- Bathelt et al. 2003** Bathelt, Jens, et al. 2003. *Conceptual Design Approach for Mechatronic Systems Controlled by a Programmable Logic Controller (PLC) : Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm, 19.-21. August 2003*, S. 497-498.
ISBN 1-904670-00-8.
- Bayer et al. 2008** Bayer, Daniel & Bender, Jan. 2008. Vergleich der impulsbasierten Dynamiksimulation mit der Lagrange-Faktoren-Methode.
In: Schumann, Marco, Kuhlen, Torsten (Hrsg.): *Virtuelle und Erweiterte Realität - 5. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR.*
Herzogenrath : Shaker Verlag, S. 185-196.
ISBN 978-3-8322-7572-3.
- Beckhoff 2014** Beckhoff, Hans. 2014. *Beckhoff New Automation Technology.*
Verl : Beckhoff Automation GmbH & Co. KG,
zuletzt geprüft am 26. September 2014.
Verfügbar: <http://www.beckhoff.com>
- Bender 2007** Bender, Jan. 2007. *Impulsbasierte Dynamiksimulation von Mehrkörpersystemen in der virtuellen Realität.*
Karlsruhe : Universitätsverlag Karlsruhe.
ISBN 978-3-86644-127-9.

DOI: 10.5445/KSP/1000006079.

Karlsruhe, Univ., Diss., 2007.

Bender 2013

Bender, Jan. 2013. *Impulse-Based Dynamic Simulation*.

Aachen : RWTH Aachen,

zuletzt geprüft am 26. September 2014.

Verfügbar: <http://www.sourceforge.net/projects/ibds>

Boehm 1984

Boehm, Barry. W. 1984.

Verifying and Validating Software Requirements and Design Specifications.

IEEE Software **1** (1) S. 75-88.

DOI: 10.1109/MS.1984.233702.

Boer 2005

Boer, Csaba. 2005. *Distributed simulation in industry*.

Rotterdam : Erasmus University Rotterdam.

ERIM Ph.D. Series Research in Management.

ISBN 978-90-5892-093-5.

Rotterdam, Univ., Diss., 2005.

Carpenter et al. 1997

Carpenter, Bill, *et al.* 1997. *The RTX Real-Time Subsystem for Windows NT* : Proceedings of the USENIX Windows NT Workshop, Seattle, 11.-13. August 1997, S. 33-37.

Chance et al. 1996

Chance, Frank, Robinson, Jennifer & Fowler, John. 1996. Supporting manufacturing with simulation: Model design, development, and deployment.

In: Charnes, John m., Morrice, Douglas j, Brunner, Daniel T. & Swain, James J. (Hrsg.): *1996 Winter Simulation Conference Proceedings*.

Coronado : IEEE, S. 114-121.

ISBN 0-7803-3383-7.

- Cleff 2010** Cleff, Torsten. 2010. *Basiswissen Testen von Software*.
Herdecke/Witten : W3L.
ISBN 978-3-868-34012-9
- Coumans 2014** Coumans, Erwin. 2014. *Bullet Physics Library*.
Online : Real-Time Physics Simulation
zuletzt geprüft am 26. September 2014.
Verfügbar: <http://www.bulletphysics.org/wordpress>
- Danielsson et al. 2003**
Danielsson, Frederik, Moore, Philip & Eriksson, Patric. 2003.
Validation, off-line programming and optimisation of industrial control logic.
Mechatronics **13** (6) S. 571-585.
DOI: 10.1016/S0957-4158(02)00030-2.
- Dierßen 2002** Dierßen, Stefan. 2002. *Systemkopplung zur komponentenorientierten Simulation digitaler Produkte*.
Zürich : VDI-Verlag.
Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren
Nr. 358.
ISBN 3-18-335820-4.
Zürich, Univ., Diss., 2002.
- DIN 30781** Deutsches Institut für Normung. 1989. *DIN 30781-1:1989-05: Transportkette; Grundbegriffe*.
Berlin : Beuth Verlag.
- Ehmann 2001** Ehmann, Stephen. 2001. *SWIFT++ Speedy Walking via Improved Feature Testing for Non-Convex Objects*.
Chapel Hill : The University of North Carolina,
zuletzt geprüft am 26. September 2014.
Verfügbar: <http://gamma.cs.unc.edu/SWIFT++>

- Ericson 2005** Ericson, Christer. 2005. *Real-time collision detection*.
Boca Raton : Taylor & Francis.
ISBN 978-1-558-60732-3.
- Felippa et al. 2001** Felippa, Carlos A., Park, Kwang-Chun & Farhat, Charbel. 2001.
Partitioned analysis of coupled mechanical systems.
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering **190** (24-25), S. 3247-3270.
DOI: 10.1016/S0045-7825(00)00391-1.
- Fischer et al. 2003** Fischer, Wolfram & Dittrich, Lothar. 2003. *Materialfluß und Logistik: Potentiale vom Konzept bis zur Detailauslegung*.
2. erw. Aufl.
Berlin, Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-540-40187-2.
- Forrester 1977** Forrester, Jay Wright. 1977. *Industrial dynamics*.
9. Aufl.
Cambridge : MIT Press.
- Gaugele et al. 2008** Gaugele, Timo, Fleissner, Florian & Eberhard, Peter. 2008.
Simulation of material tests using meshfree lagrangian particle methods.
Proceedings of the the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics **222** (K4), S. 327-338.
DOI: 10.1243/14644193JMBD167.
- Göttlich et al. 2014** Göttlich, Simone, et al. 2014.
Modeling, simulation and validation of material flow on conveyor belts.
Applied Mathematical Modelling **38** (13), S. 3295-3313.
DOI: 10.1007/978-3-642-23860-4_52.
- HP 1994** Hewlett-Packard. 1994. *Standard Template Library Programmer's Guide*.

San Jose : Silicon Graphics International,
zuletzt geprüft am 26. September 2014.
Verfügbar: <http://www.sgi.com/tech/stl>

- Hoher et al. 2011b** Hoher, Simon & Röck, Sascha. 2011.
A contribution to the real-time simulation of coupled finite element
models of machine tools – A numerical comparison.
Simulation Modelling Practice and Theory **19** (7), S. 1627-1639.
DOI: 10.1016/j.simpat.2011.03.002.
- Hoher et al. 2011a** Hoher, Simon, et al. 2011. *System Dynamic Models and Real-time
Simulation of Complex Material Flow Systems*.
In: ElMaraghy, Hoda (Hrsg.): *Enabling Manufacturing
Competitiveness and Economic Sustainability*.
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 316-321.
ISBN 978-3-642-23859-8.
DOI: 10.1007/978-3-642-23860-4.
- Hoher et al. 2012** Hoher, Simon & Verl, Alexander. 2012. Multi-Simulator-Materialfluss-
simulation für die virtuelle Inbetriebnahme.
In: Frey, G., Schumacher, W., Verl, A., (Hrsg.): *SPS IPC DRIVES:
Tagungsband; internationale Fachmesse und Kongress. Nürnberg,
27.-29. November 2012*.
Berlin ; Offenbach : VDE-Verlag, S. 387-396.
ISBN 978-3-8007-3464-1.
- Hopp et al. 1991** Hopp, Wallace J. & Spearman, Mark L. 1991.
Throughput of a constant work in process manufacturing line subject
to failures.
International Journal of Production Research **29** (3), S. 635-655.
DOI: 10.1080/00207549108930093.
- Jiménez et al. 2001** Jiménez, Pablo, Thomas, Federico & Torras, Carme. 2001.
3D collision detection: a survey.

Computers & Graphics **25** (2), S. 269-285.

DOI: 10.1016/S0097-8493(00)00130-8.

Jodin et al. 2006 Jodin, Dirk & ten Hompel, Michael. 2006. *Sortier- und Verteilsysteme: Grundlagen, Aufbau, Berechnung und Realisierung*.

1. Aufl.

Berlin, Heidelberg : Springer.

ISBN 978-3-540-29071-1.

DOI: 10.1007/3-540-29071-0.

Jünemann et al. 1998

Jünemann, Reinhardt & Beyer, Andreas. 1998. *Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen; Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik*.

2. Aufl.

Berlin, Heidelberg : Springer.

ISBN 978-3-540-64514-6.

DOI: 10.1007/978-3-642-72225-7.

Kaiser 1999 Kaiser, Oliver. 1999. *Echtzeitanforderungen zur Simulation technischer Produkte*.

München : Herbert Utz Verlag.

ISBN 3-8967-5734-2.

München, Techn. Univ., Diss., 2000.

Kantorovich et al. 2011

Kantorovich, Sofia, et al. 2011.

Magnetic particles with shifted dipoles.

Journal of Magnetism and Magnetic Materials **323** (10), S. 1269–1272.

DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.11.019.

Kortüm et al. 1994 Kortüm, Willi & Lugner, Peter. 1994. *Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen*.

1. Aufl.

Berlin, Heidelberg : Springer.

ISBN 978-3-642-47625-9.

DOI: 10.1007/978-3-642-47623-5.

Krämer 2002

Krämer, Klaus. 2002. *Automatisierung in Materialfluss und Logistik*.
1. Aufl.

Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag.

ISBN 978-3-8244-2152-7.

DOI: 10.1007/978-3-322-81221-6.

Kübler et al. 2000a

Kübler, Ralf & Schiehlen, Werner. 2000.

Modular Simulation in Multibody System Dynamics.

Multibody System Dynamics **4** (2-3), S. 107-127.

DOI: 10.1023/A:1009810318420.

Kübler et al. 2000b

Kübler, Ralf & Schiehlen, Werner. 2000.

Two Methods of Simulator Coupling.

Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems **6** (2),
S. 93-113.

Kuo et al. 2002

Kuo, Stephen. S., et al. 2002. Modeling continuous flow with
discrete-event simulation.

In: Peters, Brett A., Smith, Jeffrey S., Medeiros, D. J., Rohrer, Matt W.
(Hrsg.): *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*.

Arlington : IEEE, S. 1099-1103.

ISBN 0-7803-7307-3.

DOI: 10.1109/WSC.2001.977420.

Lacour 2012

Lacour, Frédéric-Felix. 2012. *Modellbildung für die physikbasierte
Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen*.

München : Herbert Utz Verlag.

ISBN 978-3831641628.

München, Techn. Univ., Diss. 2012.

Langston et al. 1995

Langston, Paul A., Tüzün, Ugür & Heyes, David M. 1995.
Discrete element simulation of granular flow in 2d and 3d hoppers:
Dependence of discharge rate and wall stress on particle
interactions.
Chemical Engineering Science **50** (6), S. 967-987.
DOI: 10.1016/0009-2509(94)00467-6.

Lin et al. 1998

Lin, Ming & Gottschalk, Stefan. 1998. *Collision detection between
geometric models: A survey* : Proceedings of the 8th IMA Conference
on Mathematics of Surfaces, S. 37-56.

Martin 2014

Martin, Heinrich. 2014. *Transport- und Lagerlogistik*.
9. Auflage.
Wiesbaden : Springer Vieweg.
ISBN 978-3-658-03143-5.
DOI: 10.1007/978-3-658-03143-5.

Meier et al. 2000

Meier, Horst & Kreusch, Karsten. 2000.
Virtuelle Maschinen für eine realistische Simulation.
wt Werkstattstechnik online **90** (1/2), S. 19-21.

Min et al. 2002

Min, Byung-Kwon, et al. 2002.
Integration of real-time control simulation to a virtual manufacturing
environment.
Journal of Advanced Manufacturing Systems **1** (1), S. 67-87.
DOI: 10.1142/S0219686702000076.

Mirtich et al. 1995

Mirtich, Brian & Canny, John 1995. Impulse-based simulation of rigid
bodies.
In: Zyda, Michael (Hrsg.): *Proceedings of the 1995 symposium on
Interactive 3D graphics*.
New York : ACM Press, S. 181-188.
ISBN 0-89791-736-7.
DOI: 10.1145/199404.199436.

- Mirtich 1997** Mirtich, Brian. 1997. *V-Clip: Fast and Robust Polyhedral Collision Detection*.
Cambridge : Mitsubishi Electric Research Laboratories,
zuletzt geprüft am 26. September 2014.
Verfügbar: www.merl.com/publications/TR97-05
- Moore et al. 1988** Moore, Matthew & Wilhelms, Jane. 1988. Collision detection and response for computer animation.
In: Beach, Richard J. (Hrsg.): *Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*.
New York : ACM Press, S. 289-298.
ISBN 0-89791-275-6.
DOI: 10.1145/54852.378528.
- Neyrinck et al. 2012**
Neyrinck, Adrian & Verl, Alexander. 2012. Optimale Maschinen und Anlagen durch Simulation von Varianten in der Konzeptionsphase.
In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): *Automation 2012 : der 13. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*.
Düsseldorf : VDI-Verlag, S. 375-379.
ISBN 9783180921716.
- Obenland et al. 1999**
Obenland, Kevin M., et al. 1999. Comparing the real-time performance of Windows NT to an NT real-time extension.
In: The IEEE Computer Society Technical Committee on Real-Time Systems (Hrsg.): *Proceedings of the Fifth IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium*.
Washington, Brussels, Tokyo : IEEE Computer Society, S. 142-151.
ISBN 0-7695-0194-X.
- Popov 2010** Popov, Valentin 2010. *Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications*.

1. Aufl.

Berlin, Heidelberg : Springer.

ISBN 978-3-642-10802-0.

DOI: 10.1007/978-3-642-10803-7.

Pritschow et al. 2004

Pritschow, Günter & Röck, Sascha. 2004.

“Hardware in the Loop” Simulation of Machine Tools.

CIRP Annals - Manufacturing Technology **53** (1), S. 295-298.

DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60701-X.

Pritschow et al. 2005

Pritschow, Günter, Röck, Sascha & Rüdele, Hartmut. 2005.

Echtzeitfähige Simulation von Werkzeugmaschinen.

wt Werkstattstechnik online **95** (5), S. 302-308.

Qhull 2014

Qhull. 2014. *Qhull*.

Minneapolis : University of Minnesota,

zuletzt geprüft am 26. September 2014.

Verfügbar: www.qhull.org

Reinhart et al. 2007 Reinhart, Gunther & Wünsch, Georg. 2007.

Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems.

Production Engineering **1** (4), S. 371-379.

DOI: 10.1007/s11740-007-0066-0.

Reinhart et al. 2009 Reinhart, Gunther & Lacour, Frédéric-Felix. 2009. Physically based Virtual Commissioning of Material Flow Intensive Manufacturing Plants.

In: Zäh, Michael (Hrsg.): *3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009)*.

München : Herbert Utz Verlag, S. 377-387.

ISBN 978-3-831-60933-8.

Reinhart et al. 2010b

Reinhart, Gunther & Lacour, Frédéric-Felix. 2010. *Physikbasierte mechatronische Simulation materialflussintensiver Produktionsanlagen* : 7. Paderborner Workshop "Entwurf mechatronischer Systeme". Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, 18.-19. März 2010, Paderborn, S. 85-97.

Reinhart et al. 2010a

Reinhart, Gunther & Lacour, Frédéric-Felix. 2010. *Skalierbare Simulation kinematischer Strukturen in der physikbasierten Virtuellen Inbetriebnahme* : 9. Paderborner Workshop „Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung“. Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, 10.-11. Juni 2010, Paderborn, S. 113-127.

Röck 2007

Röck, Sascha. 2007. *Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungssystemen*.
Heimsheim : Jost-Jetter Verlag.
ISW-Forschung und -Praxis; 168.
ISBN 978-3-939890-24-9.
Stuttgart, Univ., Diss., 2007

Römisch 2012

Römisch, Peter. 2012. *Materialflusstechnik*.
10. Aufl.
Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag.
ISBN 978-3-8348-8196-0.
DOI: 10.1007/978-3-8348-8196-0.

Rücker 2006

Rücker, Thomas. 2006. *Optimale Materialflussteuerung in heterogenen Produktionssystemen*.
1. Aufl.
Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag.
ISBN 978-3-8350-0536-5.
DOI: 10.1007/978-3-8350-9372-0.

Schlecht et al. 2001 Schlecht, Berthold., et al. 2001.

Mehrkörper-Simulation im Brücken- und Stahlwasserbau - Beispiel:
Drehbrücke über den Suez-Kanal.

Stahlbau **70** (12), S. 973-982.

DOI: 10.1002/stab.200103210.

Seidel et al. 2012 Seidel, Stephan, Donath, Ulrich & Haufe, Jürgen. 2012. *Approach to a simulation-based verification environment for material handling systems* : ETFA 2012 - Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, Krakau, 17.-21. September 2012.

ISBN 978-1-4673-4737-2.

DOI: 10.1109/ETFA.2012.6489744.

Spitzweg 2009 Spitzweg, Michael. 2009. *Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen*.

München : Herbert Utz Verlag.

Forschungsberichte IWB; 233.

ISBN 978-3-8316-0931-4.

München, Techn. Univ., Diss., 2009.

Stepanov et al. 1995

Stepanov, Alexander & Lee, Meng. 1995. *The standard template library* : Hewlett-Packard Laboratories, Technical Publications Department.

Palo Alto : Hewlett Packard Labs.

Stoeppler et al. 2005

Stoeppler, Guido, Menzel, Thomas & Douglas, Steve. 2005.

Hardware-in-the-loop simulation of machine tools and manufacturing systems.

Computing & Control Engineering Journal **16** (1), S. 10-15.

DOI: 10.1049/cce:20050101.

Van den Bergen 2003

Van den Bergen, Gino. 2003. *SOLID Collision Detection Library*.
Helmond : Dtecta,
zuletzt geprüft am 26. September 2014.
Verfügbar: www.dtecta.com

VDI 2510

Verein Deutscher Ingenieure. 2005. *VDI 2510:2005-10: Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*.
Berlin : Beuth Verlag.

VDI 2515

Verein Deutscher Ingenieure. 1998. *VDI 2515 Blatt 2: Identträger in Stückgutfördersystemen - Mobile Datenspeicher*.
Berlin : Beuth Verlag.

VDI 2860

Verein Deutscher Ingenieure. 1990. *VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*.
Berlin : Beuth Verlag.

VDI 3633-1

Verein Deutscher Ingenieure. 2010. *VDI 3633 Blatt 1:2014-12: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen - Grundlagen*.
Berlin : Beuth Verlag.

VDI 3633-8

Verein Deutscher Ingenieure. 2007. *VDI 3633 Blatt 8:2007-04: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen - Maschinennahe Simulation*.
Berlin : Beuth-Verlag.

VDI 4440-1

Verein Deutscher Ingenieure. 2007. *VDI 4440 Blatt 1 Entwurf: Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut (Entwurf)*.
Berlin : Beuth Verlag.

Wilke 2006

Wilke, Michael 2006. *Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen*.
München : Herbert Utz Verlag.

ISBN 3-8316-0591-2.

München, Techn. Univ., Diss., 2006.

Wischnewski et al. 2004

Wischnewski, Roland & Freund, Eckhard. 2004. *COSIMIR Transport: Modeling, Simulation and Emulation of Modular Carrier Based Transport Systems* : IEEE International Conference on Robotics & Automation ICRA04, 26. April - 1. Mai 2004, New Orleans, S. 5171-5176.

ISBN 0-7803-8232-3.

DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1302538.

Wischnewski 2007 Wischnewski, Roland. 2007. Transportsysteme mit Spurführung in der Virtuellen Produktion.

Düsseldorf : VDI Verlag.

ISBN 978-3-18-341020-0.

Aachen, Univ., Diss., 2007.

Wischnewski et al. 2010

Wischnewski, Roland & Rossmann, Jürgen. 2010. *A new hybrid time-based / event-based simulation method for transport systems considering physical effects* : 2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 28.-30.Juni 2010, Singapore, S. 470-475.

ISBN 978-1-4244-6503-3.

DOI: 10.1109/RAMECH.2010.5513149.

Wriggers 2006

Wriggers, Peter. 2006. *Computational Contact Mechanics*.
2. Aufl.

Berlin, Heidelberg : Springer.

ISBN 978-3-540-32608-3.

DOI: 10.1007/978-3-540-32609-0

Wünsch 2007

Wünsch, Georg. 2007. *Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme*.

München : Herbert Utz Verlag.
Forschungsberichte IWB; 215.
ISBN 978-3-8316-0795-2.
München, Techn. Univ., Diss., 2007.

Kapitel 11

Anhang

11.1 Vorarbeiten am ISW

Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), an dem diese Arbeit angefertigt wurde, beschäftigt sich schon seit geraumer Zeit mit der Verbindung von Simulation von Produktionsanlagen und Steuerungstechnik. (Röck, 2007)

Dieses Simulationswerkzeug wird im Rahmen dieser Arbeit genutzt, um das gekoppelte Materialflussmodell zu realisieren. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Teile des Softwarewerkzeugs kurz erläutert.

Die Systemarchitektur des Simulationswerkzeugs gliedert sich in drei wesentliche Bestandteile (Röck, 2007):

1. **„Echtzeit-Rechenkern:** Rechenkern für Logik, Kinematik, Regelung und Kinetik.“ (Röck, 2007)
2. **„Simulation-Benutzer-Schnittstelle:** Modellierungswerkzeug auf Basis von Blockschaltbildern [...] sowie Monitoringwerkzeug zur Online-Beeinflussung und -beobachtung des Simulationsverlaufs.“ (Röck, 2007)
3. **„Visualisierung-Benutzer-Schnittstelle:** 3D-Visualisierungswerkzeug zur Modellierung und Visualisierung von Maschinenbewegungen [...]. Dieses Werkzeug umfasst die Modellierung komplexer 3D-Szenen und ermöglicht das Importieren von VRML-Daten (**V**irtual **R**eality **M**odeling **L**anguage).“ (Röck, 2007)

Der Echtzeit-Rechenkern wurde mit Windows 7 der Firma Microsoft mit der Echtzeiterweiterung TwinCAT 2.11 der Firma Beckhoff (Beckhoff 2014) realisiert. Diese Echtzeiterweiterung implementiert die meisten gängigen Feldbustreiber und ermöglicht auch eine mehrka-

nalige Feldbusanbindung. Weiterhin wird eine Steuerungsemulation von CNC (eng.: Computerized Numerical Control), PLC (eng.: Programmable Logic Controller) und MC (eng.: Motion Control) unterstützt.

Der Echtzeit-Rechenkern „*wird im Bustakt zur Berechnung angestoßen*“ (Röck, 2007) und fordert realzeitdeterministische Berechnungsalgorithmen. Bei mehrkanaliger Feldbusanbindung ist der Simulationstakt das kleinste gemeinsame Vielfache aller Feldbustakte. Der heute gängige Simulationstakt für Materialflussanwendungen liegt im Bereich von 1 und 100 Millisekunden.

ISG-virtuos und TwinCAT können beliebig um Simulationscode erweitert werden, sofern dieser in C++ implementiert ist. TwinCAT unterstützt alle gängigen Mathematik-Befehle. Weitere Systembibliotheken, wie beispielsweise die sehr gebräuchliche „Standard Template Library“, sind nicht implementiert.

„Der Ablauf der Simulation kann in drei Abschnitte unterteilt werden. Die Initialisierungsphase, die Durchlaufphase und die Terminierungsphase. Im Gegensatz zur Durchlaufphase sind die Initialisierungsphase und die Terminierungsphase nicht echtzeitkritisch. In der Initialisierungsphase werden die einzelnen Modellblöcke je nach Modellkonfiguration aus einer Bibliothek in den Rechenkern geladen. Die Ein- und Ausgangsgrößen werden durch Verknüpfen der richtigen Adressen im Speicher des Rechenkerns angelegt. Eine weitere wichtige Initialisierungsaufgabe ist die Vorbereitung der Berechnungsalgorithmen. [...]

Nachdem die Initialisierung des Modells abgeschlossen ist, wird die Durchlaufphase gestartet. Dabei wartet der Rechenkern zunächst auf ein Signal des Bustreibers. Erst wenn alle Steuerdaten vom Bustreiber zum Modell übertragen wurden, startet der Rechenkern den nächsten Durchlauf. Nach Beendigung des Rechenschrittes werden die Ergebnisse vom Modell an den Bustreiber übertragen und der Rechenkern wartet erneut auf das nächste Signal.

Beim Stoppen des Berechnungskerns werden alle Modellkomponenten zur Terminierung aufgerufen.“ (Röck, 2007)

11.2 Testplattform

Alle präsentierten Ergebnisse wurden auf einem Desktop-PC mit Intel Core i7-3770 @ 3.4 GHz CPU durchgeführt. Die Hardwarebeschleunigungen Intel SpeedStep, Intel Turbo-Boost und Intel Hyperthreading wurden deaktiviert.

Als Betriebssystem wird das Windows 7 32-bit-Betriebssystem der Fa. Microsoft mit der Echtzeiterweiterung TwinCAT 2.11.0 Build 2102 der Fa. Beckhoff eingesetzt. Alle Berechnungen werden mit einer 64-bit-Gleitkomma-Arithmetik ausgeführt.

Das Ergebnis einer periodischen Jittermessung innerhalb der Echtzeitbetriebssystemerweiterung ist in Abbildung 55 dargestellt. Dafür wurde eine definierte Berechnung mit einer idealen Periodendauer von 50 μ s in einem Zeitraum von 120 s alle 10 ms wiederholt. Der periodische Jitter ist die Abweichung der tatsächlichen Periodendauer von der idealen Periodendauer pro Berechnungsschritt.

Anhand der Jittermessung (s. Abbildung 55) kann davon ausgegangen werden, dass die ermittelten Berechnungszeiten im Bereich von $\pm 0,5 \mu$ s genau sind.

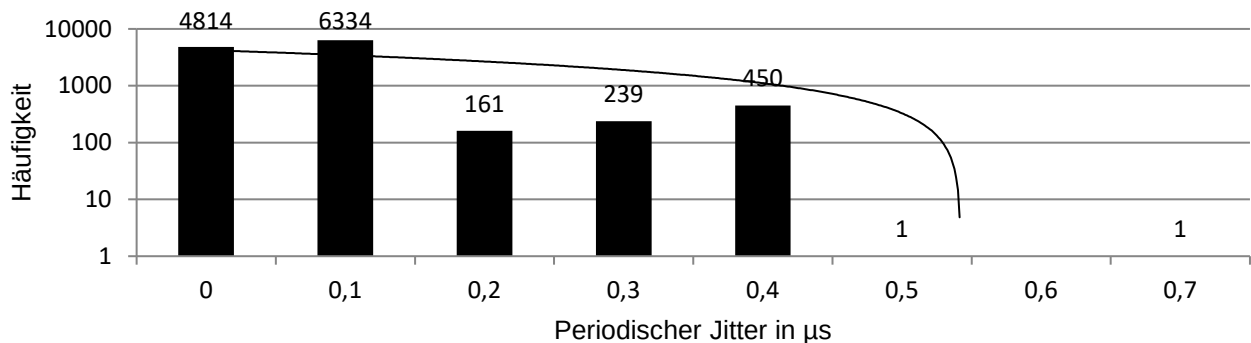


Abbildung 55: Häufigkeit des periodischen Jitter in Mikrosekunden. Schwarz durchgezogen ist die lineare Trendlinie eingezeichnet.

Innerbetriebliche Materialflusssysteme beeinflussen unmittelbar die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. Die Anforderungen an die Materialflussteuerung haben zugleich ein hohes Ausmaß an Komplexität erreicht. Die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß von Ausfällen der Steuerungstechnik durch Softwarefehler stellen ein dominierendes Problem im innerbetrieblichen Materialfluss dar. Deshalb werden je nach Entwicklungsphase und Zielsetzung neue individuelle und problemspezifische Materialflusssimulationen entworfen, um die Entwicklung des innerbetrieblichen Materialflusssystems abzusichern.

Ziel dieser Arbeit ist es, die unterschiedlichen Materialflussmodelle in einem Materialflussmodell zu koppeln. Die Entwicklung der Materialflussteuerung kann dann mit einem einzigen Simulationsmodell und gezielten Simulationsläufen unterstützt werden. Dadurch reduziert sich der Modellerstellungsaufwand erheblich. Außerdem können doppelte Schritte bei der Modellerstellung vermieden werden und die Modellvalidität für bereits erstellte Modelle bleibt erhalten.

ISBN 978-3-8396-1197-5



FRAUNHOFER VERLAG