

# 1 Einführung

In zunehmendem Maße vollzieht sich in der Industrie eine Ausrichtung auf individuelle Kundenwünsche. Während noch vor einigen Jahren im Rahmen der Massenproduktion und Automatisierung der Fokus der Industrie auf der Effizienzsteigerung der Produktion und weniger auf der Erfüllung von kundenspezifischen Anforderungen lag, hat sich dieses Bild seit dem Ende des 20. Jahrhunderts deutlich gewandelt [Ha07]. Unter dem steigenden Wettbewerbsdruck ist heute ein Bestehen des Industrieunternehmens langfristig nur dann gesichert, wenn es gelingt, fortlaufend innovative Produkte zu entwickeln, an kundenbezogene Anforderungen anzupassen und dabei einen hohen Servicegrad zu erreichen. Diese Anforderungen des Kundenmarktes schlagen sich in den Unternehmen unter anderem in kürzeren Produktlebenszyklen, einer kürzeren Produkteinführungszeit, einer erhöhten Produktvielfalt und der Forderung nach einer Reduzierung der Investitionskosten nieder [BJW04]. Die große Herausforderung liegt darin, die aus der notwendigen Ausrichtung der Unternehmen auf die Kundenanforderungen resultierende Zunahme von Prozesskomplexität und -variabilität mit geeigneten Mitteln in den Griff zu bekommen. Die Steuerungssysteme, denen die Aufgabe der Steuerung des innerbetrieblichen Materialflusses obliegt, spielen hierbei eine Schlüsselrolle.

Insbesondere die zunehmende Individualisierung der Produktion und die Atomisierung der Warenströme führen zu einer Komplexitätssteigerung bei den Steuerungssystemen [tH10]. Die konventionellen, hierarchisch strukturierten Steuerungsarchitekturen logistischer Materialflusssysteme stoßen dabei an ihre Grenzen. So kann der Ausfall einer zentralen Systemkomponente den Stillstand großer Anlagenteile zur Folge haben. Vor allem aber gestalten sich bedingt durch die hohe Komplexität Anpassungen an veränderte Betriebsbedingungen schwierig (vgl. [tHN08], [GCK08]). Dabei müssen oft große Teile des Steuerungssystems neu entwickelt und optimiert werden.

Seit einiger Zeit stellt die *Dezentralisierung* von Materialflusssystemen einen vitalen Forschungsgegenstand dar, der oft unter dem Begriff *Internet der Dinge* ([GtH10], [BtH07]) genannt wird. Das Ziel liegt in einer besseren Beherrschbarkeit der Komplexität sowie der Gewährleistung einer hohen Adaptivität des Materialflusssystems an neue Gegebenheiten. Neuere Arbeiten zum Thema zeigen, dass sich durch die Wandelbarkeit von Materialflusssystemen erzielte Effizienzgewinne auch quantifizieren lassen [No11]. Die verbesserte Anpassbarkeit der Materialflusssysteme an veränderte Umgebungen ist vor allem vor dem Hintergrund immer kürzer werdender Produktlebenszyklen von großer praktischer Relevanz. Die Basis dazu bildet die Entwicklung neuer Identifizierungstechnologien wie insbesondere die RFID-Technologie. Diese erlaubt eine Verlagerung wichtiger Prozessinformationen wie dem Ziel eines Behälters oder die für den Behälter erforderlichen

Bearbeitungsschritte auf die Prozessebene ([GCK08], S. 423 f.) und ermöglicht eine Synchronisation von Informations- und Materialfluss [Mi08].

Ein Ansatz zur Realisierung dezentraler Materialflusststeuerungen, welcher sich zur Entwicklung von komplexen Softwaresystemen im Allgemeinen und Steuerungssystemen im Speziellen besonders gut eignet, stellen *Multiagentensysteme* (MAS) als Teildisziplin der Künstlichen Intelligenz dar [JB03]. Der Einsatz von autonomen Software-Einheiten, so genannten *Softwareagenten* zur Steuerung technischer Anlagen wird in den letzten Jahren intensiv erforscht (vgl. [Li11], [Mö06], [BJW04], [KK03]). Das Zusammenspiel der Softwareagenten in Multiagentensystemen stellt damit einen wichtigen Ansatz zur Realisierung des Internet der Dinge dar.

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Zur Erforschung der Funktions- und Leistungsfähigkeit einer dezentralen, multiagentenbasierten Steuerung von Materialflusssystemen ist aufgrund der hohen Systemkomplexität der Einsatz der computergestützten Simulation unverzichtbar [DC10]. Damit sich aus den Simulationsexperimenten hinreichend genaue Aussagen über die Eigenschaften einer multiagentenbasierten Steuerung ableiten lassen, muss das Simulationsmodell die Realität adäquat abbilden. Entsprechend der oben genannten Zielstellung des Internet der Dinge ist die Untersuchung von Auswirkungen der multiagentenbasierten Steuerung auf von Komplexität geprägte logistische Strukturen von besonderem Interesse.

Den Stand der Technik zur Modellierung von intralogistischen Abläufen bilden leistungsfähige kommerzielle Simulationswerkzeuge. Die Simulation großer, industrieller Materialflusssysteme unter Verwendung solcher ereignisgesteuerter Simulationswerkzeuge ermöglicht die Analyse der komplexen Entscheidungsstrukturen von dezentralen Steuerungsalgorithmen in einer realistischen Umgebung. Die bisher aus Materialflusssimulationen mit multiagentenbasierter Steuerungsphilosophie abgeleiteten Ergebnisse gehen allerdings aus Simulationsmodellen hervor, deren Abstraktionsstufe die Abbildung physikalischer Datenübertragungsvorgänge und der Sensorik nicht vorsieht. Diese Vernachlässigung der Modellierung des Verhaltens von Sensoren wie Lichtschranken und RFID-Lesegeräten beschränkt den Erkenntnisgewinn, der aus der Simulation erwächst, und lässt keine Rückschlüsse auf die Umsetzbarkeit der dezentralen Steuerung unter Berücksichtigung einer konkreten, gegebenen Hardwareinfrastruktur zu. Durch eine detaillierte Modellierung ist beispielsweise die Ableitung von für den Betrieb der realen Anlage notwendigen Hardware-Spezifikationen, z. B. die Leserate (entspricht der maximalen Geschwindigkeit, mit der Daten gelesen werden können, ausgedrückt in Bytes pro Sekunde) eines RFID-Lesegerätes, möglich.

Visuell unterstützte und CAD-basierte Entwurfsmethoden in heute verfügbaren kommerziellen Materialflusssimulatoren ermöglichen die Beschreibung zunehmend größerer Simulationsmodelle. Entsprechende Simulationsmodelle erfordern einen hohen Rechenaufwand und besitzen deshalb hohe Laufzeiten. Die Simulationsgeschwindigkeit liegt bei komplexen Materialflusssystemen oftmals deutlich unter Echtzeit. Dies betrifft insbesondere

Simulationsmodelle von Materialflusssystemen, deren Steuerung auf dem Multiagenten-Paradigma basiert. Eine Simulation mit einer Vielzahl lernfähiger Agenten kann ein zentral ausgeführtes Simulationsprogramm auf heutiger Hardware schnell an seine Grenzen bringen. „Grundsätzlich gilt: je weniger Vorwissen ein Agent hat, desto mehr muss er über seine Umgebung lernen. Je mehr ein Agent lernt, desto höher sind seine Anforderungen an die ausführende Hardware.“ [RF07] Hinzu kommt die Tatsache, dass zur Untersuchung des Systemverhaltens und zur Findung einer optimalen Steuerungsstrategie viele voneinander abhängige Simulationsläufe mit verschiedenen Input-Parametern notwendig sind, wobei die Ergebnisse möglichst schnell verfügbar sein sollen.

Insgesamt erwächst daraus erstens ein Zeitproblem. Zweitens stellen komplexe Simulationsmodelle teilweise sehr hohe Anforderungen an die Hardwareressourcen des Rechners, so dass das Erreichen einer hohen Detailgenauigkeit bei der Simulation auf einem Rechner unter Verwendung eines kommerziellen Materialflusssimulators für große Simulationsmodelle problematisch sein kann.

Mit dem Aufkommen von vergleichsweise preiswerten Parallelrechnern Ende der 70er Jahre entstanden viele Forschungsprojekte, die sich mit der Beschleunigung von Simulationsläufen durch die parallele Verarbeitung von Simulationsmodellen befassten. Im unternehmerischen Umfeld setzte sich der Einsatz von Parallelrechnern aber nicht durch. Die entwickelten Verfahren zur parallelen Verarbeitung von Simulationsmodellen lassen sich allerdings auch auf vernetzte Arbeitsplatzrechner übertragen. Die nebenläufige Ausführung eines Simulationsmodells auf solchen vernetzten Arbeitsplatzrechnern, im Folgenden auch als *verteilte Simulation* bezeichnet, bietet sich prinzipiell als Ausweg an, um die Ausführung aufwändiger Materialflussmodelle zu beschleunigen [Le06].

Im Hinblick auf die Integration von dezentralen Steuerungsmechanismen in Simulationsmodelle von ereignisgesteuerten Materialflusssimulatoren existieren noch keine Untersuchungen zum Einsatz der verteilten Simulation und deren Leistungsfähigkeit in diesem Anwendungskontext. Die erste Herausforderung für die Realisierung von verteilten Simulationssystemen liegt in der Bestimmung effizienter Verfahren für die *Synchronisation* und *Partitionierung* der Teilmodelle, die auf einzelnen miteinander vernetzten Arbeitsplatzrechnern ausgeführt werden. Die Effizienz bezieht sich hierbei auf den Einfluss der Verfahren auf die Ausführungszeit der verteilten Simulation. Je kürzer die Ausführungszeit, desto effizienter ist das Verfahren. Die Synchronisation stellt die korrekte Verarbeitung der Simulation auf einem verteilten Computersystem sicher, indem kausale Fehler, die bei der verteilten Simulation durch die Verarbeitung von Simulationsereignissen in der falschen Reihenfolge entstehen können, vermieden werden. Die Partitionierung eines Simulationsmodells bestimmt dessen Zerlegung in Teilmodelle, die im Rahmen der verteilten Simulation auf einzelnen Rechnern ausgeführt werden. Synchronisation und Partitionierung stehen bei dem Ziel, eine möglichst hohe Ausführungsgeschwindigkeit der Simulation zu erreichen, in enger Verbindung zueinander (vgl. Kapitel 3.4). Die vielen bisher im Bereich der verteilten Simulation durchgeführten Forschungsarbeiten machen deutlich, dass Aussagen über Verfahren zur Partitionierung und

Synchronisation und die damit verbundenen Effekte auf die Geschwindigkeit einer verteilten Simulation nur im Anwendungskontext gesehen werden können. Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren und nicht vernachlässigbarer Nebenbedingungen lässt sich die Frage nach der praktischen Anwendbarkeit der verteilten Simulation erst anhand von in der Praxis implementierten Anwendungen beantworten.

Die zweite Herausforderung besteht damit in der Realisierung einer Umgebung, in welcher die Verfahren zur Synchronisation und Partitionierung empirisch untersucht werden können, um stichhaltige Aussagen über ihre Leistungsfähigkeit zu erhalten. Da die insgesamt geringe Verbreitung der verteilten Simulation zur Untersuchung komplexer Szenarien insbesondere auf fehlende Realisierungen zur automatischen Partitionierung von mit kommerziellen Materialflusssimulatoren erstellten Simulationsmodellen zurückzuführen ist, sollte diese Umgebung Zwecks einfacher Nutzbarkeit einen möglichst hohen Automatisierungsgrad bei der Erstellung und Ausführung verteilter Simulationsmodelle bieten. Verteilte Simulation erfordert heute einen beträchtlichen Einsatz von Zeit und Ressourcen [Ro05]. Dies sind auch gewichtige Gründe dafür, dass die verteilte Simulation in der Industrie bisher noch eine verhältnismäßig geringe Verbreitung gefunden hat und Werkzeuge benötigt werden, die die Erstellung verteilter Simulationen vereinfachen (vgl. [BBV09], [TR06]).

Eine erweiterte Möglichkeit, die Simulation für den Test von Steuerungssystemen zu nutzen, beruht auf der Idee der Trennung von Steuerungs- und Ablauflogik. Die Logik zur Steuerung der Materialflussabläufe wird nicht mehr direkt im Simulationsmodell abgebildet. Stattdessen erfolgt eine Kopplung der dezentralen Steuerungssoftware, die auch bei dem realen Betrieb einer Anlage zum Einsatz kommt, an den Materialflusssimulator. Aus Sicht des Steuerungssystems verhält sich das Simulationsmodell exakt wie die reale Anlage. Es empfängt Telegramme, zum Beispiel eine Transportanweisung für ein Fahrzeug, und führt daraufhin die gewünschte Aktion aus. Umgekehrt werden Bestätigungsmeldungen wie das Erreichen eines Ziels vom Simulationsmodell an das Steuerungssystem gesendet. Diese Methode der Kopplung des realen Steuerungssystems mit einem Simulationsmodell wird als *Emulation* bezeichnet. Unter dem Begriff der Emulation soll hier im Folgenden speziell die Kopplung einer dezentralen multiagentenbasierten Steuerung als externes System an ein Simulationsmodell verstanden werden. Werden sowohl Steuerungs- als auch Ablauflogik im Simulationsmodell abgebildet, wird zur Unterscheidung im Folgenden von *Simulation* gesprochen.

Der Vorteil der Simulation liegt in der Reproduzierbarkeit von Simulationsläufen. Die Reproduzierbarkeit führt dazu, dass sich das Simulationsmodell bei gleichen Input-Parametern bei jeder Ausführung exakt gleich verhält. Dies führt zu einer starken Vereinfachung bei der Fehlersuche und der Analyse des Modells. Im Unterschied dazu ist die Reproduzierbarkeit bei der Emulation nicht gegeben [Da12]. Der besondere Vorteil der Emulation liegt darin begründet, dass das Steuerungssystem als Anwendung ohne weitere Veränderungen für den Betrieb in einer realen Anlage übernommen werden kann. Insgesamt ist der Nutzen der Emulation in diversen Publikationen unbestritten und stellt ein wichtiges Thema im Bereich der

Materialflusssimulation dar (vgl. [GG10], [KH10], [KS10], [VF08], [FT06], [No04], [GK02], [Mc02], [GFS00], [LT98]).

Derzeit existieren keine wissenschaftlichen Untersuchungen über Voraussetzungen und Realisierungsmöglichkeiten einer beschleunigten Ausführung von Emulationen unter Betrachtung von multiagentenbasierten Steuerungssystemen. Damit die beschleunigt ausgeführte Emulation praktisch eingesetzt werden kann, ist eine Analyse der Auswirkungen auf die Ergebnisse gegenüber der Durchführung einer Emulation im Echtzeitbetrieb, d. h. ohne Beschleunigung des Simulationsablaufs, notwendig. Eine solche Analyse bildet die Grundlage für die Ableitung von Verfahren zur Durchführung beschleunigter Emulation.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Forschungsarbeit liegt in der Entwicklung eines Frameworks, das die verteilte Simulation und Emulation von dezentral gesteuerten Materialflusssystemen unter Verwendung eines kommerziellen ereignisgesteuerten und in der Praxis bewährten Materialflusssimulators erlaubt [DF13]. Der Fokus liegt dabei auf der Betrachtung von Stetigfördersystemen, in denen die Transportsteuerung (engl.: Routing) unter Verwendung eines multiagentenbasierten Steuerungsansatzes umgesetzt wird.

Unter dem Begriff *Framework* wird hierbei ein System aus interagierenden Softwarekomponenten verstanden, die die Durchführung der verteilten Simulation und Emulation unterstützen, ohne die Details des Simulationsmodells und dessen Struktur vorzugeben. Zur Realisierung eines solchen Frameworks gehört die Erarbeitung von Lösungen für die Synchronisation und Partitionierung sowie für die Schnittstellenproblematik bei der verteilten Simulation und Emulation.

Die zentralen zu beantwortenden Forschungsfragen sind:

- Wie hoch ist die mittels verteilter Simulation erzielbare Geschwindigkeit gegenüber der klassischen sequenziellen Verarbeitung eines solchen Simulationsmodells auf einem Rechner?
- Wie steht der erreichbare Performance-Gewinn im Verhältnis zum Aufwand, der zur Realisierung einer verteilten Simulation aufgebracht werden muss?
- Welche Voraussetzungen und Möglichkeiten existieren hinsichtlich der Realisierung einer beschleunigten Ausführung einer Emulation, bei der das reale dezentrale Steuerungssystem an eine Materialflusssimulation gekoppelt wird?

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Für die Entwicklung eines Frameworks für verteilte Simulation und Emulation von dezentral gesteuerten Materialflusssystemen sind im ersten Schritt eine Auseinandersetzung mit der Idee und der grundlegenden Funktionsweise einer dezentralen Materialflussteuerung, der Simulation und ihrer Verteilung sowie der Emulation erforderlich. Kapitel 2 erläutert diese für die Arbeit relevanten Grundlagen. Zunächst werden der Begriff der Materialflussteuerung

definiert und der Aufbau sowie die Aufgaben klassischer Materialflussteuerungen beschrieben. Anschließend wird auf die Verteilung der Steuerungsfunktionen eingegangen und die daraus motivierte multiagentenbasierte Materialflussteuerung erläutert (Kapitel 2.1). Im Themenfeld der Simulation erfolgt im ersten Schritt die Einordnung des in dieser Arbeit betrachteten Simulationsparadigmas, der diskreten ereignisgesteuerten Simulation. Danach wird die Arbeitsweise eines sequenziellen, d. h. auf einem Rechner ausgeführten Simulators beschrieben und auf dieser Basis die Funktionsweise der verteilten Simulation skizziert (Kapitel 2.2). Eine Einordnung und Definition des Begriffs Emulation schließt das Grundlagenkapitel ab (Kapitel 2.3).

Die Aufarbeitung des Standes der Technik im Bereich der verteilten Simulation und Emulation ist Gegenstand von Kapitel 3. Dieses widmet sich der ausführlichen Beschreibung der Aufgaben und in der Literatur genannten Verfahren der verteilten Simulation und Emulation. Die wesentlichen Themen sind hier die Synchronisations- und Partitionierungsverfahren für Simulationsmodelle (Kapitel 3.3 und 3.4) sowie die Beschreibung von Gestaltungsmöglichkeiten einer Kopplung von Steuerungssystem und Simulator im Rahmen der Emulation (Kapitel 3.5). Eine Diskussion der Entwurfsaspekte einer Kommunikationsinfrastruktur, die den Nachrichtenaustausch zwischen den an einer verteilten Simulation bzw. Emulation beteiligten Instanzen ermöglicht, schließt das Kapitel ab (Kapitel 3.6).

Zur Beantwortung der in Kapitel 1.2 aufgeworfenen Forschungsfragen ist aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren auf die Ausführungszeit der verteilten Simulation (vgl. Abbildung 3-6 auf Seite 66) eine Evaluation des entwickelten Frameworks mittels Durchführung einer empirischen Studie unabdingbar. Die Entwicklung von dezentralen Steuerungsverfahren, die als Referenzverfahren bei der Evaluation des Frameworks für die verteilte Simulation und Emulation zum Einsatz kommen, ist daher Gegenstand von Kapitel 4. Als Basis wird zunächst ein geeignetes Modell zur Beschreibung von Materialflusssystemen im Simulationsmodell entwickelt (Kapitel 4.1). Bezogen auf dieses Modell werden der Stand der Technik im Bereich dezentraler Steuerungsverfahren aufgearbeitet und dezentrale Routingverfahren klassifiziert (Kapitel 4.2). Den Ausgangspunkt dazu bilden die in der Literatur beschriebenen Routingverfahren für Datennetzwerke, die für den vorliegenden Einsatzbereich auf Materialflusssysteme übertragen werden. Ausgehend von der Klassifikation der dezentralen Routingverfahren für Materialflusssysteme werden zwei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz in der Evaluation beschrieben und deren Funktionsweise im Detail erläutert (Kapitel 4.3).

In Kapitel 5 werden die Lösungselemente zur Entwicklung eines Frameworks für die verteilte Simulation und Emulation beschrieben. Dazu erfolgt zunächst eine Einordnung der für das Framework zu entwickelnden Softwarekomponenten anhand einer allgemeinen Darstellung einer Simulations- bzw. Emulationsstudie. Darüber hinaus wird die grobe Architektur des Frameworks skizziert (Kapitel 5.1). Ausgehend von der Identifikation der Einflussfaktoren auf den Speedup der verteilten Simulation (Kapitel 5.2) werden für die betrachtete

Anwendungsdomäne optimierte Synchronisations- und Partitionierungsverfahren angegeben (Kapitel 5.3 und 5.4). Ebenso wird zur Durchführung der beschleunigten Emulation ein Verfahren vorgestellt, welches eine Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse mit einer im Echtzeitbetrieb, d. h. ohne Beschleunigung des Simulationsablaufs durchgeführten Emulation sicherstellt (Kapitel 5.5). Abschließend wird das Konzept der für das Framework einzusetzenden Kommunikationsinfrastruktur für die verteilte Simulation und Emulation (Kapitel 5.6) beschrieben.

Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Realisierung des Frameworks für die verteilte Simulation und Emulation multiagentenbasierter Materialflusssysteme sowie der Durchführung von Versuchsläufen anhand einer Testspezifikation zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit der entwickelten Lösung. Zuerst werden dabei die im Rahmen der Evaluation verwendeten Softwarepakete beschrieben (Kapitel 6.1). Hierbei handelt es sich zum einen um den Materialflusssimulator AutoMod und zum anderen um ein Agentenframework, welches zur Realisierung eines Steuerungssystems verwendet wird, das in den Versuchsläufen bei der Emulation zum Einsatz kommt. Anschließend wird auf die Implementierungsaspekte der Softwarekomponenten des Frameworks eingegangen, wobei die Grobarchitektur aus Kapitel 5.1 detailliert wird (Kapitel 6.2). Nach einer Spezifikation der Versuchsläufe (Kapitel 6.3) werden die erzielten Ergebnisse diskutiert (Kapitel 6.4).

Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen. Darüber hinaus werden mögliche Richtungen für weitergehende Untersuchungen aufgezeigt.

Abbildung 1-1 skizziert zur Übersicht den Aufbau der Arbeit und stellt die wesentlichen Abhängigkeiten der einzelnen Abschnitte dar.

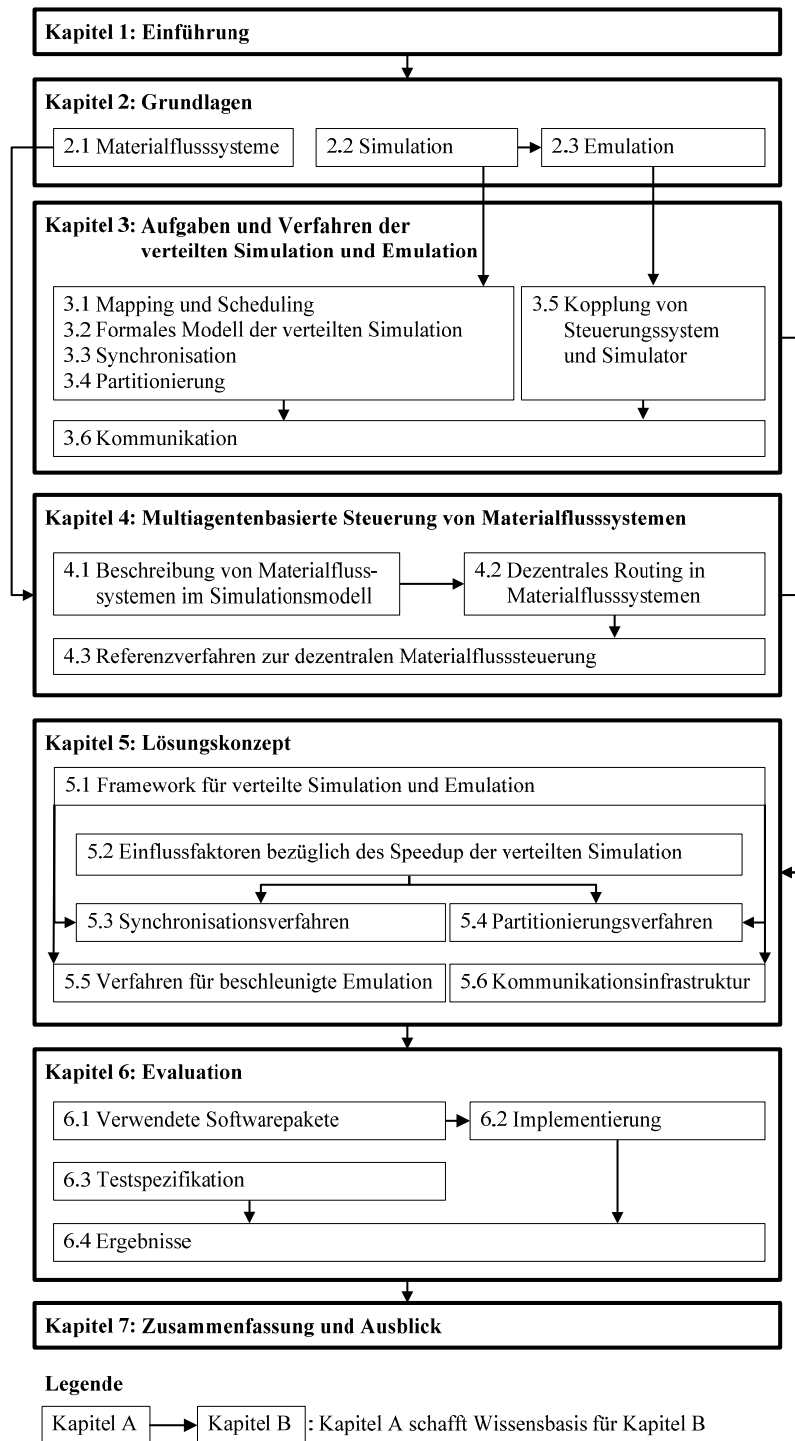


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit