

Modellierung von multiagentenbasierten Materialflusssystemen für die verteilte Simulation

Modelling of Multi-agent-based Material Flow Systems for Distributed Simulation

Damian Daniluk, Michael ten Hompel
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund (Germany)
damian.daniluk@iml.fraunhofer.de, michael.ten.hompel@iml.fraunhofer.de

Abstract: Distributed Simulation is a feasible tool to utilize memory and processors of many computer systems that cannot be provided by a single system. Particularly when using commercial material flow simulators in the field of intralogistics for analysis of multi-agent-based material flow control, there is a need to speed up simulations and to have greater computer resources available. The paper presents a modeling methodology for multi-agent-based material flow systems, describes influence factors for automatic partitioning of simulation models in this context and outlines a general scenario for distributed simulation of multi-agent-based material flow systems.

1 Motivation

Die Auswirkungen der RFID-Technologie auf die Logistik lassen sich in dem Begriff Internet der Dinge subsumieren (GÜNTNER, TEN HOMPEL 2010). Eine konsequente Umsetzung der Vision des Internet der Dinge, bei der Prinzipien des Internets auf die Gegenstände der Logistik übertragen werden, führt zu einer Ablösung von konventionellen, hierarchisch strukturierten Steuerungsarchitekturen logistischer Materialflusssysteme (MFS) durch eine dezentralisierte Steuerungsebene, in der die logistischen Objekte selbständig ihren Weg zum Ziel finden und die eine hohe Adaptivität des MFS an neue Gegebenheiten gewährleistet. Das Forschungsgebiet der Multi-Agenten-Systeme (MAS) als Teildisziplin der Künstlichen Intelligenz stellt Methoden zur Verfügung, die sich besonders gut zur Umsetzung der Idee des Internet der Dinge eignen. Das Ziel von MAS ist die Lösung von Problemen durch das Zusammenspiel von autonomen Software-Einheiten, den so genannten *Agenten*.

Zur Erforschung der Funktions- und Leistungsfähigkeit einer dezentralen, multiagentenbasierten Steuerung von MFS ist aufgrund der hohen Systemkomplexität der Einsatz der Simulation unverzichtbar, da die Beschreibung des Systemverhaltens mit analytischen Modellen nicht mehr handhabbar ist. Damit sich aus den Simulations-

experimenten hinreichend genaue Aussagen über die Eigenschaften einer multiagentenbasierten Steuerung ableiten lassen, muss das Simulationsmodell die Realität adäquat abbilden. Da im Vergleich zu konventionellen Steuerungsmechanismen zu erwarten ist, dass die Umsetzung des der Vision Internet der Dinge insbesondere in komplexen Materialflussumgebungen zu spürbaren Vorteilen in Hinblick auf Wartbarkeit, Flexibilität und Adaptivität der Anlage führt, ist die Untersuchung von Auswirkungen der multiagentenbasierten Steuerung auf solche von Komplexität geprägten logistischen Strukturen von besonderem Interesse.

Den Stand der Technik zur Modellierung von intralogistischen Abläufen bilden leistungsfähige kommerzielle Simulationswerkzeuge. Die Simulation großer, industrieller MFS 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 als Bytes pro Sekunde) eines RFID-Lesegerätes, möglich. Entsprechende Simulationsmodelle erfordern einen hohen Rechenaufwand und besitzen deshalb hohe Laufzeiten. 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 den Speicherausbau des Rechners. Somit ist das Erreichen einer hohen Detailgenauigkeit bei der Simulation auf einem Rechner unter Verwendung von kommerziellen Materialflusssimulatoren für große Simulationsmodelle problematisch. Als Ausweg bietet sich hier die Verwendung der verteilten Simulation an (LENDERMANN 2006). Durch die Nutzung kommerzieller Materialflusssimulatoren sowie die Integration von dezentralen Steuerungsmechanismen im Simulationsmodell von ereignisgesteuerten Materialflusssimulatoren ergeben sich neue Herausforderungen für die Realisierung von verteilten Simulationssystemen.

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst eine allgemeine Modellierung von Stetigfördersystemen vorgeschlagen, in die jedes entsprechende Simulationsmodell überführt werden kann (Kapitel 2). Anschließend wird das Modell derart erweitert, dass es zur Abbildung eines agentenbasierten Steuerungsansatzes verwendet werden kann (Kapitel 3). Das dezentrale Steuerungsprinzip ermöglicht es, neben den Infrastrukturkomponenten des Simulationsmodells auch die Steuerungslogik im Rahmen der verteilten Simulation auf unterschiedlichen Rechnern zu simulieren. Das entwickelte Modell bildet die Grundlage, um das Simulationsmodell eines MFS (automatisiert) in mehrere Teilmodelle, auch *logische Prozesse* (LP) genannt, zu

unterteilen (Partitionierung). Bei der verteilten Simulation wird jeder LP einem auf einem separaten Rechner ausgeführt. Der Beitrag beschreibt die Ziele einer Partitionierung sowie die Nutzung des Modells in diesem Kontext (Kapitel 4). Danach wird ein allgemeines Szenario beschrieben, wie das entwickelte Modell praktisch für die Durchführung einer Simulationsstudie herangezogen werden kann und auf die im Rahmen der verteilten Simulation von MFS notwendigen und geplanten Forschungsaktivitäten eingegangen (Kapitel 5).

2 Modellierung von MFS

Ein Materialflusssystem kann als ein Netzwerk von Quellen, Senken, (Bearbeitungs-)Stationen und Lagermitteln angesehen werden, die durch die Verbindungselemente miteinander verknüpft sind (vgl. GUDEHUS 2005, S. 472). Zur Modellierung von Materialflusssystemen wird häufig die Graphentheorie herangezogen (DIESTEL 2005). Mit Hilfe eines Graphen können alle wichtigen Informationen eines Materialflusssystems in eine vergleichsweise einfache Darstellung überführt werden. Aufgrund der Nähe zu den Eingabedaten von Partitionierungsmethoden (SCHLOEGEL, KARYPIS, KUMAR 2003; JOHANNES 1996) und der Nähe zur üblichen Beschreibungsgrundlage für Routingverfahren (LEON-GARCIA, WIDJAJA 2000, S. 484 ff.) eignet sich die Modellierung des Materialflusssystems als Graph besonders gut.

Zur mathematischen Beschreibung des im Simulationsmodell abgebildeten Materialflusssystems wird der gerichtete *Stationengraph* $G_s = (V_s, E_s)$ eingeführt. Die Knotenmenge $V_s = \{S_i | i = 1, \dots, n\}$ entspricht der Menge der Stationen S_i des Materialflusssystems. Die *Stationen* eines Materialflusssystems umfassen Elementarstationen und Transportelemente. Zu den *Elementarstationen* gehören alle Ursprungspunkte (Quellen), an denen die Arbeitsgegenstände, im Folgenden auch *Lastobjekte* genannt, in das Simulationsmodell eingesteuert werden sowie alle Zielpunkte (Senken, Bearbeitungsstationen, Lagermittel), die von den Lastobjekten als (Zwischen-)Ziele adressiert werden können. Die *Transportelemente* (Verbindungselemente, Verzweigungen, Zusammenführungen, Kreuzungen) ergeben sich durch die Verknüpfung von Förderstrecken. Sowohl Elementarstationen als auch Transportelemente lassen sich durch den Ordnungstyp charakterisieren, wobei der Ordnungstyp für die Transportelemente ein eindeutiges Charakterisierungsmerkmal darstellt. Eine Station besitzt die *Ordnung* $o = n + m$ genau dann, wenn sie n Eingangsfördergutströme in m Ausgangsfördergutströme überführt. Die Station ist dann vom *Ordnungstyp* (n, m) (vgl. GUDEHUS 2005, S. 475).

Ein Knoten S_i des Stationengraphen mit Eingangsgrad n und Ausgangsgrad m repräsentiert somit eine Station vom Ordnungstyp (n, m) . In Tabelle 1 sind die Stationen mit dem Ordnungstyp und einer Kurzbeschreibung aufgeführt.

Die Kantenmenge $E_s \subseteq V_s \times V_s$ des Stationengraphen repräsentiert die gerichteten Transportbeziehungen zwischen den Stationen auf Materialflussebene. Eine Kante entspricht damit immer auch einer physischen Förderstrecke des Systems mit der jeweiligen Förderrichtung. Die Kanten modellieren damit immer einen Zeitverbrauch bei dem Transport eines Lastobjektes.

	Station	Ordnungstyp	Beschreibung
Elementarstation	Quelle	$(0, m)$ mit $m \geq 1$	Erzeugung von Lastobjekten
	Senke	$(n, 0)$ mit $n \geq 1$	Entfernung von Lastobjekten aus dem Simulationsmodell
	Bearbeitungsstation	(n, m) mit $n, m \geq 1$	Verknüpfungspunkt Bearbeitungsstation: Ausübung einer Tätigkeit am Lastobjekt
	Lagermittel	(n, m) mit $n, m \geq 1$	Verknüpfungspunkt Lagermittel: Lagerung des Lastobjektes
Transportelement	Verbindungselement	$(1, 1)$	Verbindung zwischen zwei Fördertechnikabschnitten
	Verzweigung	$(1, m)$ mit $m \geq 2$	Verteilung von einem Eingangsfördergutstrom auf mehrere Ausgangsfördergutströme
	Zusammenführung	$(n, 1)$ mit $n \geq 2$	Zusammenführung von mehreren Eingangsfördergutströmen zu einem Ausgangsfördergutstrom
	Kreuzung	(n, m) mit $n, m \geq 2$	Verteilung von mehreren Eingangsfördergutströmen auf mehrere Ausgangsfördergutströme

Tabelle 1: Elemente eines Materialflussmodells

3 Agentenbasiertes Modell von MFS

Ein Agent ist eine proaktive Entscheidungsinstanz, die sich fortlaufend an die dynamische Umwelt anpasst (vgl. BUSSMANN, JENNINGS, WOOLDRIDGE 2004, S. 143). Als solche muss der Agent in einem MFS gewisse Entscheidungen treffen. Ebenso können allen Entitäten in einem MFS, denen Entscheidungsaufgaben zugeordnet werden können, Agenten zugeordnet werden.

Legt man den Fokus auf die Routingfunktion, so können allen Infrastrukturelementen des Stetigfördersystems Agenten zugeordnet werden. Die Infrastrukturelemente sind die *Fördertechnikmodule (FTM)*. Um zusätzlich Lagermittel und Bearbeitungsstationen als autonome Betriebseinheiten in das MFS integrieren zu können (vgl. Tabelle 1), werden darüber hinaus Lagermittel- und Bearbeitungsstation-Module eingeführt, die mit den FTM verknüpft sein können. Lagermittel, Bearbeitungsstationen und FTM werden übergeordnet als *Materialflussmodule (MFM)* bezeichnet. Ein MFS kann damit als Menge von miteinander verknüpften MFM angesehen werden.

Ein FTM ist eine Förderstrecke mit n Eingängen und m Ausgängen zu benachbarten FTM. Es entspricht einer Verkettung einer Menge von Stationen, wie sie in Tabelle 1 aufgeführt sind. Unter einer Verkettung von Stationen wird hier eine Folge (S_1, S_2, \dots, S_n) von Stationen verstanden, bei der Station S_i mit Station S_{i+1} über eine gerichtete Kante von S_i nach S_{i+1} verbunden ist ($i \in \{1, \dots, n-1\}$) und es gilt: $\forall i, j \in \{1, \dots, n\}: i \neq j \Rightarrow S_i \neq S_j$. Jedes FTM hat eine festgelegte Förderrichtung. Allgemein gilt für ein MFM:

- Ein MFM enthält eine eigene Steuerung, die unabhängig von den Steuerungen anderer MFM ist.

- Ein MFM kann mit den an den Eingängen und Ausgängen angeschlossenen (Nachbar-) MFM kommunizieren.
- Betritt ein Lastobjekt das MFM, so ist das MFM in der Lage, die Zielinformation des Lastobjektes auszulesen.

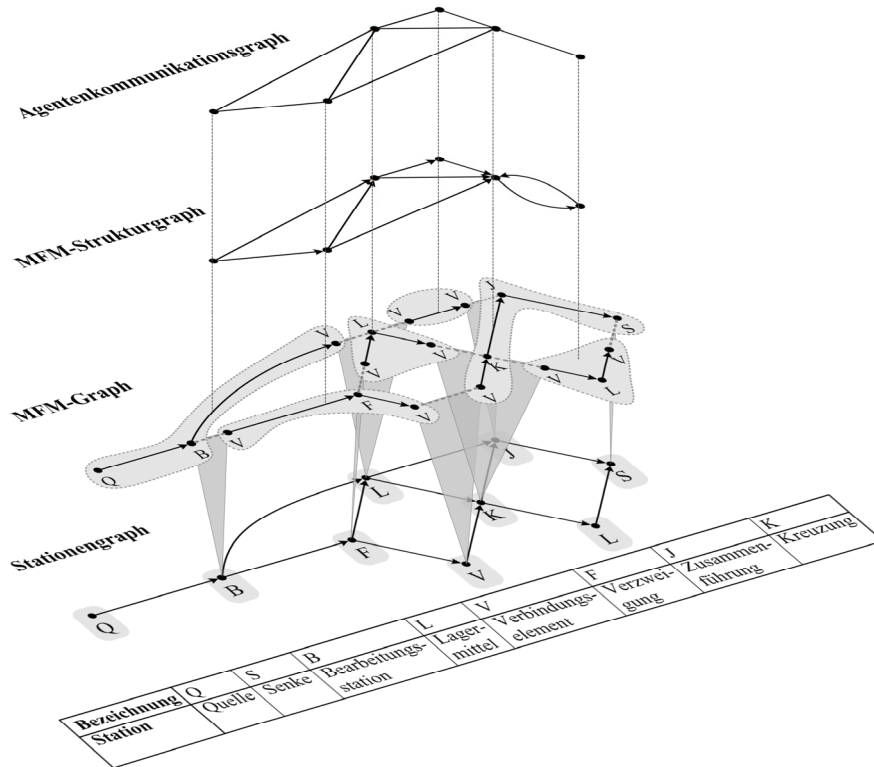


Abbildung 1: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Stationengraph, MFM-Graph, MFM-Strukturgraph und Agentenkommunikationsgraph

Eine unzusammenhängende Menge von MFM wird als *MFM-Graph* $G_M = (V_M, E_M)$ mit Knotenmenge $V_M = \{v_i \mid i = 1, \dots, n\}$ und Kantenmenge $E_M \subseteq V_M \times V_M$ dargestellt. In Abbildung 1 ist ein MFM-Graph skizziert. Die insgesamt sechs MFM sind dabei grau hinterlegt. Der MFM-Graph spezifiziert eine Menge von Infrastrukturelementen (MFM), denen jeweils ein Agent zugeordnet wird. Damit aus den einzelnen MFM ein MFS entsteht, müssen diese miteinander verknüpft werden. Die grau gestrichelten Linien zwischen den MFM des MFM-Graphen aus Abbildung 1 geben eine mögliche Ausprägung von Verknüpfungen zwischen den MFM an und beschreiben damit eine mögliche Struktur des aus den abgebildeten MFM zusammengesetzten MFS. Legt man diese Strukturinformationen zu Grunde, so ist eine Überführung des MFM-Graphen in einen Stationengraphen möglich. Die MFM werden dabei an den entsprechenden Eingangs- und Ausgangsstationen zusammengeführt. Der Stationengraph stellt den zentralen Routinggraphen des MFS dar. Neben dem Stationengraphen lässt sich unter Verwendung der Struk-

turinformationen der *MFM-Strukturgraph* angeben, welcher die Flussbeziehungen (Verknüpfung der MFM und Richtung des Materialflusses) zwischen den MFM wiedergibt. Ein dezentrales Routing kann nun durch die Kommunikation der den einzelnen MFM zugeordneten Agenten realisiert werden. Die Kommunikationsinfrastruktur, d. h. die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Agenten, ergeben sich durch Umwandlung der gerichteten Kanten des MFM-Strukturgraphen in ungegerichtete Kanten. Der daraus resultierende *Agentenkommunikationsgraph* $G_A = (V_A, E_A)$, der dem Datennetzwerk für das Routing entspricht, ist ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt. Jeder Agent kennt dabei den ihn betreffenden Teil des MFM-Graphen, um Routingentscheidungen treffen zu können. Dies umfasst die Stationen des MFM, deren Verknüpfung sowie die Transportdauern zwischen den Stationen. Durch Interaktion realisieren die Agenten ein zielgerichtetes Routing der Lastobjekte im Stetigfördersystem. Auf diese Weise wird eine multiagentenbasierte Steuerung von MFS realisiert.

4 Partitionierung von MFS

Der MFM-Strukturgraph eignet sich als Basis für die Partitionierung des Simulationsmodells. Ist P ist die Menge aller MFM des Simulationsmodells, so gilt für die Partitionierung P_1, \dots, P_n des Simulationsmodells in n Teilmodelle: $\cup_{i=1}^n P_i = P$; $\forall i, j \in \{1, \dots, n\}: i \neq j \Rightarrow P_i \cap P_j = \emptyset$. Ein logischer Prozess LP_i simuliert die Partition P_i . Jeder LP wird auf einem separaten Rechner ausgeführt.

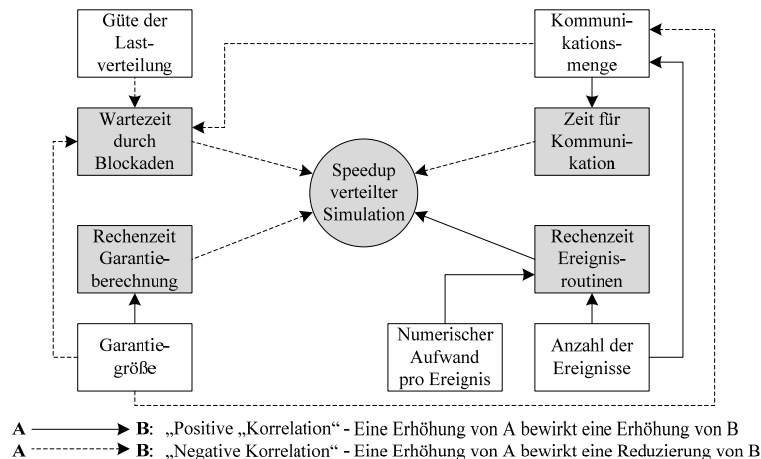


Abbildung 2: Einflussfaktoren auf den Speedup der verteilten Simulation

Abbildung 2 stellt die wesentlichen im Rahmen der Forschungsaktivitäten identifizierten Einflussfaktoren auf den Speedup der verteilten Simulation dar. Die grau hinterlegten Kästchen beschreiben die Elemente, aus denen sich die Ausführungszeit der verteilten Simulation zusammensetzt sowie deren Auswirkung auf den Speedup der verteilten Simulation. Darüber hinaus sind die wichtigsten Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen skizziert. Ein Partitionierungsverfahren muss diese Einflussfaktoren berücksichtigen, um eine möglichst hohe Beschleunigung der ver-

teilten Simulation zu erzielen. Das Partitionierungsverfahren muss das Gesamtmodell unter anderem derart in Teilmodelle unterteilen, dass die Kommunikation zwischen den logischen Prozessen minimiert und gleichzeitig die Ausführungsparallelität des Gesamtsystems maximiert wird (MEHL 1994).

5 Szenario und Ausblick

In Abbildung 3 ist die Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie unter Verwendung der sequenziellen Simulation der Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie unter Verwendung der verteilten Simulation gegenübergestellt.

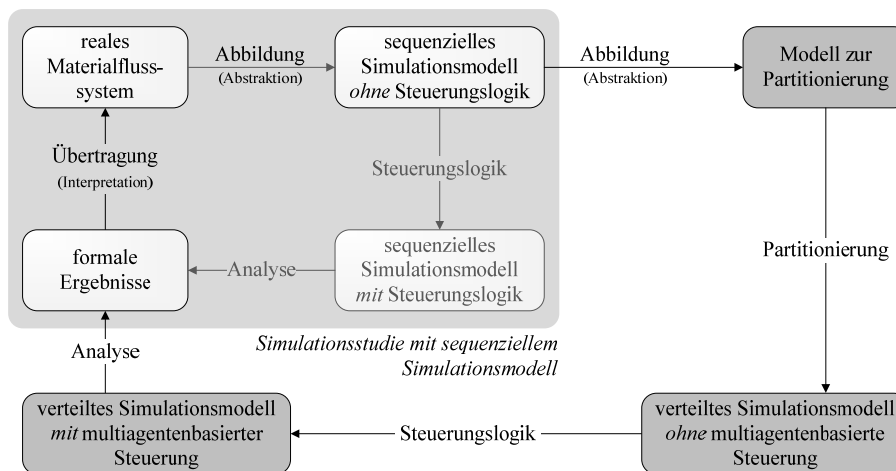


Abbildung 3: Vorgehensweise bei der Simulationsstudie mit einem verteilten Simulationsmodell gegenüber einem sequenziellen Simulationsmodell

Bei einer Simulationsstudie erfolgt im ersten Schritt ausgehend von dem realen MFS eine Abbildung als Simulationsmodell. Da die kommerziellen ereignisdiskreten Materialflusssimulatoren die Abbildung von agentenbasierten Steuerungskonzepten nicht von Hause aus unterstützen, muss die Agentenlogik bei der sequenziellen Simulation im nächsten Schritt in das so erzeugte Simulationsmodell eingefügt werden. Anschließend werden Experimente mit dem Simulationsmodell durchgeführt. Die so gewonnenen formalen Ergebnisse können anschließend auf das reale MFS übertragen werden.

Im Fall der verteilten Simulation erfolgt eine Transformation des sequenziellen Simulationsmodells in ein Modell, welches die zur Partitionierung relevanten Informationen beinhaltet. Hierzu eignet sich der in dem vorliegenden Beitrag vorgestellte MFM-Strukturgraph. Dieses Modell dient als Ausgangspunkt für die anwendungsoptimierte Partitionierung, bei der die in Kapitel 4 beschriebenen Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind. Nach der Partitionierung existiert ein verteiltes Simulationsmodell, d.h. es liegen mehrere sequenzielle Teilmodelle vor, die zusammen genommen das Gesamtmodell bilden. Im nächsten Schritt werden diese Teilmodelle mit der Agentenlogik versehen, um anschließend Experimente mittels verteilter

Simulation durchzuführen. Ebenso wie im sequenziellen Fall können die so gewonnenen formalen Ergebnisse anschließend auf das reale MFS übertragen werden.

Die aktuelle Forschung am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML umfasst die Entwicklung eines Frameworks, das die automatisierte Partitionierung und Modellgenerierung unter Verwendung des kommerziellen Materialflusssimulators *AutoMod* der Firma Brooks Automation, Inc. realisiert. Das Ziel liegt in der Untersuchung des erzielbaren Speedups der Simulation von multiagentenbasierten Materialflussteuerungen mittels verteilter Simulation und der automatisierten Teilmodellerzeugung. Durch die verteilte Simulation können auch sehr komplexe Modelle durch Nutzung mehrerer Rechner und deren Ressourcen analysiert werden.

Literatur

- BUSSMANN, S.; JENNINGS, N. R.; WOOLDRIDGE, M.: Multiagent systems for manufacturing control. A design methodology. Berlin: Springer, 2004.
- DIESTEL, R.: Graph theory. Reihentitel: Graduate texts in mathematics, Band 173. Berlin: Springer, 3. Auflage 2005.
- FUJIMOTO, R. M.: Parallel and distributed simulation systems. New York: Wiley, 2000.
- GUDEHUS, T.: Logistik. Grundlagen, Strategien, Anwendungen. Berlin: Springer, 3. Auflage 2005.
- GÜNTHNER, W.; TEN HOMPEL, M. (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Berlin: Springer, 2010.
- JOHANNES, F. M.: Partitioning of VLSI circuits and systems. In: Proceedings of the 33rd annual conference on Design automation. New York, NY: ACM Order Dep., 1996, S. 83-87.
- LENDERMANN, P.: About the need for distributed simulation technology for the resolution of real-world manufacturing and logistics problems. In: Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2006, S. 1119-1128.
- LEON-GARCIA, A.; WIDJAJA, I.: Communication networks. Fundamental concepts and key architectures. Boston, MA: McGraw-Hill, 2000.
- MEHL, H.: Methoden verteilter Simulation. Braunschweig: Vieweg, 1994.
- SCHLOEGEL, K.; KARYPIS, G.; KUMAR, V.: Graph partitioning for high-performance scientific simulations. In: Sourcebook of parallel computing. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2003, S. 491-541.