

Multiagentensimulation in komplexen Logistiksystemen am Beispiel der Baustellenlogistik

Multi-Agent-Simulation in complex logistics systems, especially in construction areas

Hubertus Franke, Hochschule Ostfalia, Salzgitter (Germany), hu.franke@ostfalia.de

Abstract: Multi Agent Systems (MAS) require a good environment description. Petri-Nets can be used to describe the complex environment of a MAS, because they can model both ‘non-deterministic’ and the asynchronous situations. In this way MAS could use the Petri-Net to make a decision in its complex environment. Moreover the behaviour of the MAS can also be described by Petri-Nets as well. To model the behaviour of MAS, Petri-Nets should be extended with new elements like special elements for “Agent Communication”. A possible application for this model could be a decision-support-system in logistics, especially in construction sites realized with smartphones. Here smartphones could be Agents that control a logistics scenario, where the logistics environment is modelled by Petri-Nets. Here a prototype of a Multi-Agent-System based on a Petri-Net-Simulation-Tool called ©renew has been realized.

1 Einleitung

Multiagentensysteme in der Logistik sind ein denkbarer Ansatz, um einerseits die verschiedenen Objekte, Elemente und Prozesse auf einer (Groß-)Baustelle zu modellieren und andererseits, um die gestellten logistischen Aufgaben mittels dezentraler Interaktion der Agenten durch Agentenverhandlung zu lösen. In diesem Zusammenhang ist auch eine Kombination mit anderen Modellen denkbar und auch erstrebenswert, die auf Basis einer formalen, abstrakten Darstellung der Logistikkustände und Prozesse auf einer Baustelle den nötigen „Agentenlebensraum“, d.h. die Agentenumwelt modellieren könnten. Petri-Netze stellen diesbezüglich ein geeignetes Instrument zur Verfügung, um einerseits alle Elemente und Beziehungen und andererseits alle Prozesse auf einer Baustelle zu beschreiben. Insbesondere der Sachverhalt, dass multivariante Entscheidungsmöglichkeiten zu demselben Gesamtziel führen können, bietet die Basis für eine Zusammenführung der beiden Modelle (Agenten und Petri-Netze): Agenten können die zu erwartenden nichtdeterministischen Entscheidungssituationen der Petri-Netze durch

Agentenverhandlung und anschließendem agentengesteuerten Schalten der jeweiligen Petri-Netz-Transitionen lösen! Im Folgenden soll eine mögliche Agentenverhandlung in einem Baustellenzenario über Petri-Netze modelliert und anschließend mit einer geeigneten Software zur Agentensimulation simuliert werden.

2 Grundlagen zur Multiagentensimulation in der Baustellenlogistik

Gemäß (Schenk et al. 2006) liegt eine besondere Herausforderung für eine dezentrale Logistiksteuerung im Bereich der Baustellenlogistik, da gerade hier viele unabhängige Akteure miteinander interagieren und ein übergeordnetes gesamtheitliches Ziel verfolgen. Komplexe Logistikbereiche betrachten einerseits die verschiedenen Ver- und Entsorgungsbereiche der Materialien bei variabler Erzeugnisstruktur und andererseits die Koordination der Ressourcen, Betriebsmittel und Mitarbeiter in einem sich kontinuierlich veränderlichen Zeitfenstern. Belegt wird dies u.a. durch ein Zitat von (Perdomo-Rivera et al. 2004, zitiert in Schenk et al. 2006), das besagt, dass 50% der Produktivitätsreduzierung auf Baustellen in den USA auf mangelnde Materialversorgung zurück zu führen ist. Dieser Beitrag soll daher, u.a. im Rahmen seiner Beispiele, einen dezentralen agentenbasierten Ansatz liefern, um eine Erhöhung der Produktivität in der Baustellenlogistik zu gewährleisten. Das hier beschriebene Modell soll anschließend in einem Multiagentenumfeld simuliert werden. Zur näheren Beschreibung der Baustellenlogistik wird auf die einschlägige Literatur verwiesen, wie z.B. (Clausen 2006 und Schenk et al. 2006).

2.1 Petri-Netze zur Logistikablaufsteuerung

Petri-Netze bedienen eine Modellierungstechnik, die sich seit Jahrzehnten für die Veranschaulichung von Systemen, insbesondere Logistiksystemen, etabliert hat. Durch Petri-Netze können Konstruktionen von Systemen, die informationstechnische Komponenten erhalten, modelliert werden (Baumgarten 1996). Strukturell bestehen Petri-Netze aus zwei Sorten von Elementen. Zum einen aus Stellen, die graphisch durch einen Kreis oder eine Ellipse dargestellt werden, zum anderen aus Transitionen, die als Quadrat oder Rechteck dargestellt werden (*Vgl. Reisig, W., 2010, S.22*). Diese Elemente werden durch gerichtete Kanten verbunden, welche graphisch durch einen Pfeil dargestellt werden. „Eine Kante modelliert niemals eine Systemkomponente, sondern immer eine abstrakte, manchmal nur gedankliche Beziehung zwischen Komponenten; beispielsweise logischer Zusammenhang“ (*vgl. Reisig, W., 2010, S.1-22*). Stellen können mit beliebig vielen Marken belegt sein, diese Markierung stellt den Zustand eines Systems dar. Die Dynamik eines Petri-Netzes entsteht durch das Schalten von Transitionen: Beim Schalten entnimmt die Transition die Markierungen aus einer Stelle und gibt sie an die nächste Stelle weiter. In der Regel können Transitionen nur dann schalten, wenn alle auf die Transition gerichteten Stellen mit mindestens einer Marke belegt sind. Für tiefere Informationen wird auf die grundlegende Literatur verwiesen, wie z.B. (Baumgarten 1996 und Leszak et. al. 1987).

2.2 Multiagentensysteme in der Logistik

Wenn (Software-)Agenten gemeinsam handeln, um eine Aufgabe oder ein Problem zu lösen, dann spricht man von Multi-Agenten-Systemen. (Klügel 2001, S. 17f.) “An

agent is an encapsulated computer system that is situated in some environment, and that is capable of flexible, autonomous action in that environment in order to meet its design objectives.“ (Jennings 1999, S. 2) Bei Agenten verfügt jeder einzelne Agent über ein spezifisches Fachwissen, das ihn u. U. zu einem Experten auf einem Gebiet macht. Andererseits verfügt er aber nur über ein begrenztes Wissen in Bezug auf seine Umwelt und über „seinen Bereich“ hinausgehende Probleme. Somit ist ein Agent auf die „Mithilfe“ bzw. Kooperation mit anderen Agenten angewiesen, um komplexe Probleme lösen zu können. Die Agenten sind Spezialisten. Jeder kann zur Lösung eines Problems einen Teil beitragen, aber nicht das ganze Problem allein lösen. Deshalb müssen die Agenten in irgendeiner Form kooperieren und zu diesem Zweck müssen sie miteinander kommunizieren. Der einzelne Agent löst im Rahmen eines Multi-Agenten-Systems den „Problemtteil“, über dessen Lösungsmöglichkeiten er verfügt. Somit kommt es, bezogen auf den einzelnen Agenten, zu einer lokalen Lösung eines Teilbereichs des Gesamtproblems, das dann mit Hilfe aller Teillösungen zu einer Gesamtlösung zusammengefasst wird. *„Typischerweise versuchen Multi-Agenten-Systeme ihre lokalen Problemlösungsplätze zu fusionieren und arbeiten dadurch gemeinsam auf ein selbstdefiniertes globales Ziel hin.“* (Lüth 1998, S. 41f.).

3 Stand der Forschung im Bereich der agentenbasierten Planung und Steuerung

Die meisten Ansätze zur agentenbasierten Planung und Steuerung, insbesondere im Baustellenbereich, sind im umfangreichen Forschungsgebiet des Supply Chain Management zu finden. Dies basiert auf der Tatsache, dass gerade das Supply Chain Management viele Aspekte eines komplexen Baustellenszenarios „im Großen“ darstellt. Die verschiedenen heterogenen Baustellenbereiche, die i.d.R. durch ökonomisch unabhängige Unternehmen dargestellt werden, sind hierbei synonym für die beteiligten Unternehmen in einer Supply Chain anzusehen. Auch gerade im Bereich der Baustellenlogistik gibt es ein übergeordnetes „Produkt“ das die entsprechenden Vorgaben für alle beteiligten Baustelleneinheiten vorgibt, wie es auch i.d.R. im Supply Chain Management der Fall ist. Weitergehende Informationen hierzu sind insbesondere in (Clausen 2006) zu finden.

Im 2004 initiierten Sonderforschungsprojekt SFB 637 (Selbststeuerung logistischer Prozesse) ist federführend von der Universität Bremen die Wichtigkeit der Thematik dargestellt worden (Sonderforschungsbereich 637). Gerade in den A und B Projekten wird der Einsatz von Multiagentensystemen im Supply Chain Management tiefer untersucht. Das Fraunhofer IML in Dortmund untersucht in speziellen Arbeitsgruppen das Verhalten von Akteuren im Bereich der Baustellenlogistik und betrachtet neben dem Einsatz von Multiagentensystemen, insbesondere die Auswirkungen von Auto-Id-Technologien wie RFID und (mehrdimensionale) Barcodes (ten Hompel 2006). Derzeit arbeiten die Wissenschaftler zusammen mit Partnern aus der Wirtschaft an einem Versuchsaufbau eines Materialfluss-Systems, das ohne zentrale Steuerungsinstanz, mit Hilfe von intelligenten Behältern und mobilen Software-Agenten, autonom gesteuert wird (Fraunhofer IML 2004). Einen innovativen Beitrag zum Thema „RFID und Agententechnologie“ gibt R. Zimmermann im DFG-Projekt „Tracking und Tracing für betrieblichen Leistungserstellung entlang der Wertschöpfungskette“. Hier wird betrachtet, wie innerhalb von Supply Chains interorganisatorische Informationsdefizite hinsichtlich der operativen Fortschritte und

Störungen in den Fulfillment-Prozessen bestehen. Die Folgen, in Form von hohen Kapitalkosten, überhöhten Lagerbeständen sowie langen Durchlaufzeiten, werden mit Hilfe eines agentenbasiertes Tracking- und Tracing-Konzepts behandelt, das die Überwachung von Aufträgen und deren Beziehungen über Unternehmensgrenzen hinweg ermöglicht. Ziele sind hierbei die gezielten Verbesserungen der operativen Prozessabwicklung in Supply Chains (Zimmermann et. al. 20002). In (Franke 2004) wird der wechselseitige Einsatz von Multiagentensystemen zur Steuerung unternehmensübergreifender Logistiknetzwerke untersucht. Schwerpunkt der Forschungsarbeit hierbei ist das wechselseitige Verhalten von synchron und asynchron kommunizierenden Agenten. Asynchron versuchen Agenten (klassisch) eine initiale Lösung zu bekommen. Weiterhin synchronisieren sich die Agenten, um bestehenden Lösungen zeitweise zu verbessern. Zusammenfassend kann ergänzt werden, dass im Umfeld die Arbeiten in den Kasbah (Chavez et al. 1996), MARTIN (Hensel 1998), Planet-AS (Mannmeusel 1995), MAS-MARS (Fischer et al. 1995), TRAMPAS-Z (Falk 1995), PAMAS (Zimmermann et al. 2003), Dialog (Främling et al. 2003), PROVE (Szirbik 2002), CoagenS (Dangelmaier et al. 2004), DISPOWEB (Grolik et al. 2001), Macroscope (Windischbauer 2001), DASCh (van Parunak 1998) notwendige Vorüberlegungen im Bereich des agentenbasierten Verhaltens bzw. der agentenbasierten Simulation in Supply-Chains geliefert haben. Eine recht aktuelle Arbeit im Bereich der Multiagentensimulation im Baustellenbereich beschäftigt sich mit der Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation. Es werden hier ein Entwurf und eine prototypische Implementierung einer CAD-integrierten Simulationsmodellierungsumgebung für die Entwicklung agentenbasierter Simulationsmodelle im Hochbau durchgeführt. (Kugler 2012). In (Franke, Matteoschat 2009) werden Systeme untersucht, die für den Einsatz einer Agentensimulation geeignet wären. Eine konkrete Implementierung wird lediglich prototypisch angedeutet. Es sind somit keine weiteren Systeme bekannt, die eine agentenbasierte Simulation in komplexen Logistiksystemen auf Basis von Petri-Netzen konkret beschreiben.

Es soll daher ein konkreter Ansatz dargestellt werden, wie über Multiagentensimulation ein Baustellenszenario gesteuert werden kann. Hierbei soll eine Simulation über den Petri-Netz-Simulator ©renew der Uni-Hamburg (Kummer et. al. 2004) durchgeführt werden, wobei die Agenten selbst als Petri-Netze modelliert worden sind.

4 Konzept und Modellierung eines MAS für die Baustellenlogistik

Im Hinblick auf eine prototypische Realisierung einer Multi-Agentensimulation zur Planung und –steuerung in der Baustellenlogistik soll ein lückenloser Übergang von der Modellierung bis hin zur prototypischen Umsetzung dargestellt werden. In Abbildung 1 ist in diesem Zusammenhang ein Baustellen-Szenario beschrieben, das den Weg vom realen Szenario über die konzeptionelle Modellierung bis hin zur Darstellung der zur Umsetzung relevanten Technologien und Konzepte beschreibt.

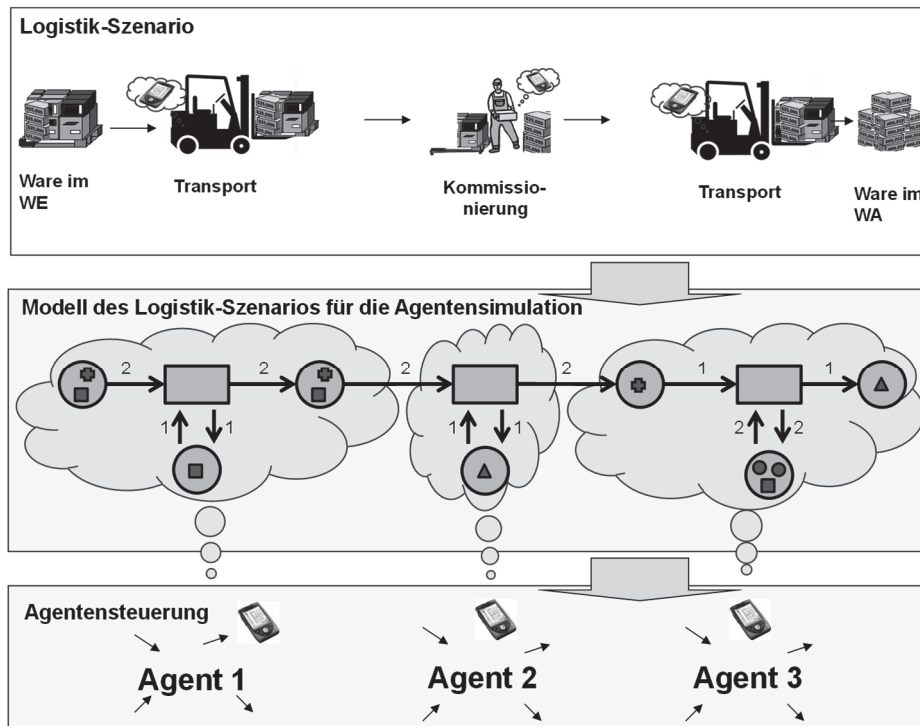


Abbildung 1: RFID und PDAs (Personal Digital Assistant) bei der Agentenmodellierung

Das Szenario beschreibt einen Materialfluss, der in einem Wareneingang eines Baustellenbereiches beginnt, einen Transport mittels Stapler zu einem weiteren Baubereich erfordert und nach einem Kommissioniervorgang die Ware in den Warenausgang transportiert. Entsprechend den Modellierungsvorgaben von Petri-Netzen können die „Zwischenzustände der Waren“ als Stellen auf horizontaler Ebene mit den Transitionen und die benötigten Potenzialfaktoren wie Stapler, Kommissionierer und Montagemitarbeiter als Stellen unterhalb der jeweiligen Transitionen dargestellt werden. Die Prozesse „Transport“ und „Kommissionieren“ können in selbiger Reihenfolge den Transitionen des Petri-Netzes zugeordnet werden. Verschiedenartige Marken in den Stellen, die beispielhaft durch kleine Kreise, Dreiecke und Vierecke symbolisiert sind, sollen die Ausprägungen des Logistikszenarios darstellen, wie z.B. „Ware im Wareneingang“, „Stapler für einen Transport zum Kommissionierbereich“ und „Kommissionierer und Stapler mit Waren im Transport zum Warenausgang“. Geht man davon aus, dass ein Agent jeweils einem Teilnetz eines Petri-Netzes zugeordnet ist und geht man weiterhin primär davon aus, dass insbesondere die Mitarbeiter im Baubereich über einen Agenten in Form eines PDA/Smartphones oder Laptops verfügen, so ist gemäß Abbildung 1 die angegebene Aufteilung eine mögliche Einteilung.

5 Umsetzung einer Multiagentensimulation

Im Folgenden soll die Umsetzung eines Multiagentensystems für die Baustellenlogistik mit Hilfe eines Petri-Netz-basierten Simulationstools modelliert und prototypisch realisiert werden. Es werden daher sowohl das fiktive Baustellenszenario als auch die Multiagentensimulation beschrieben und vorgestellt.

5.1 Beispielszenario einer Multiagentensimulation

Der im unteren Teil von Abbildung 1 vereinfacht dargestellte Kommunikationsablauf zwischen den Agenten soll nun konkreter dargestellt werden. Es wird daher in Abbildung 2 ein mögliches Szenario geschildert, wo in zwei Baubereichen zeitgleich eine Kommissionierung von Material stattfinden soll. Die Agenten der verschiedenen Kommissionierbereiche lösen dieses Problem über Agentenkommunikation, genau genommen in Form einer Agentenverhandlung. Dieser Sachverhalt wird mit Hilfe der Petri-Netz-Simulationssoftware ©renew dargestellt und implementiert. Um hierbei ein nichtdeterministisches Verhalten zu umgehen, bei dem nicht geklärt ist welcher Baubereich zuerst beliefert werden kann, verhandeln die jeweiligen Agenten die Zeiten um einen Transport der Ressourcen, d.h. der Agent des Staplers verhandelt mit den Agenten der Kommissionierbereiche A und B, wer zuerst eine Kommissionierung durchführen soll. Hierzu werden initial „Prioritäten“ abgefragt, die im System vereinfacht über Zahlenwerte dargestellt sind. Dies ist in den Stellen von „Jobliste Stapler A“ und „Jobliste Stapler B“ durch verschiedene Zahlenwerte dargestellt worden. Das nachfolgende Logistik-Szenario ist zwar aufgrund seiner exemplarischen Darstellung recht einfach gehalten, beschreibt aber die Grundstruktur für die Erstellung komplexer Szenarien auf Basis von Petri-Netzen und Agenten. Der Baubereich ist als Beispiel gewählt worden, da gerade hier viele heterogene Logistikbereiche aufeinander treffen.

5.2 Agentensimulation mit ©renew

Nachdem ein Beispielbereich einer Baustellenlogistik durch ein Petri-Netz beschrieben wurde, soll dieser mit Hilfe entsprechender Tools simuliert werden.

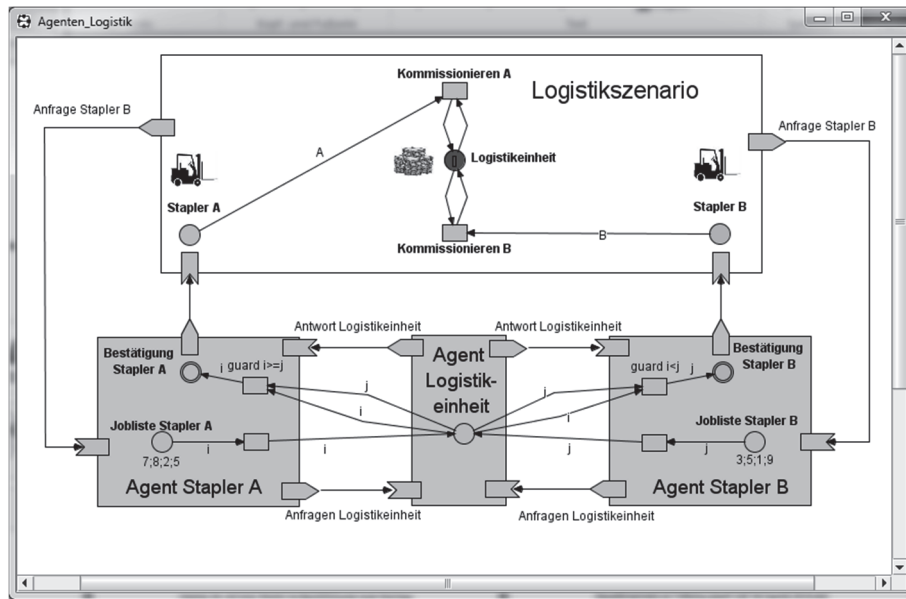


Abbildung 2: Agentensimulation mit ©renew

In Abbildung 2 ist im oberen Bereich das reale LogistikszENARIO beschrieben, bei dem eine Logistikeinheit, z.B. eine Palette, von zwei verschiedenen Staplern kommissioniert werden kann. Betrachtet man ausschließlich diesen Petri-Netz-Bereich, so ist es nicht definiert, welcher der beiden Stapler dies durchführen kann, wenn hypothetisch sowohl die Stellen für „Stapler A“ als auch für „Stapler B“ eine steuernde Marken haben.

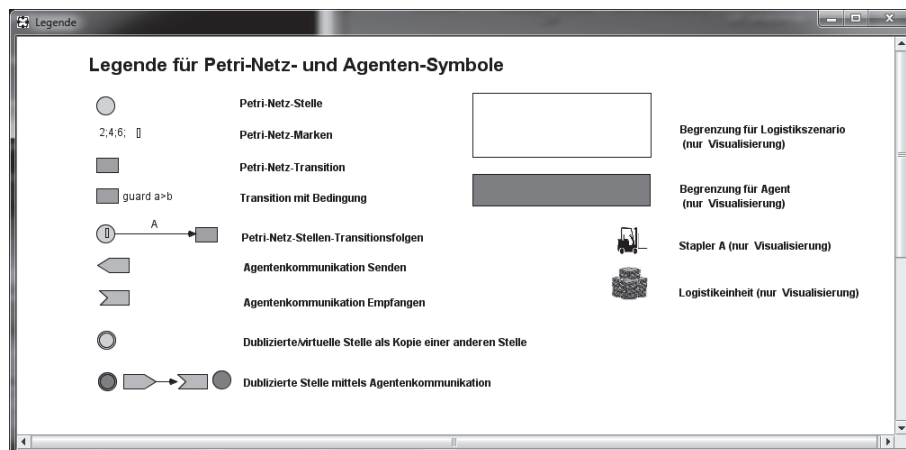


Abbildung 3: Legende zu Abbildung 2

Die Entscheidung dazu wird mit Hilfe der im unteren Teil der Abbildung 2 beschrieben Agenten gelöst, indem initial beide „Stapler-Stellen“ keine steuernde

Marke haben. Hier ist jeweils ein Agent für jede Stelle im oberen ‚Teil‘ des Petri-Netzes verantwortlich. So verhandeln die Agenten für „Stapler A“ und „Stapler B“ mit dem Agenten für die Logistikeinheit, wer von beiden die Kommissionierung durchführen soll. Zur Vereinfachung ist diese Verhandlung ebenfalls über Petri-Netze beschrieben. Zur Visualisierung sind hierbei, zusätzlich zu den üblichen Petri-Netz-Symbolen, noch Symbole für Agentenkommunikation und Agentenabgrenzung dargestellt worden. Die konkrete Legende dazu ist in Abbildung 3 ersichtlich. Insbesondere die Petri-Netz-Komponenten zur Agentenkommunikation werden in (Ferber 1999) beschrieben und untersucht. So ist beispielsweise in Abbildung 2 in „Jobliste Stapler A“ die Prioritätenmenge $\{7;8;2;5\}$ und in „Jobliste Stapler B“ die Prioritätenmenge $\{3;5;1;8\}$ dargestellt. Da es sich um Mengen handelt, werden zufällig zwei Prioritäteneinträge miteinander verglichen und in der zugehörigen Transition über einen Größenvergleich weitergeleitet. Dies erfolgt über die Anweisung „guard $i \geq j$ “ oder entsprechend über „guard $j > i$ “. Im Fall von $i \geq j$ wird eine Steuermarke in die Stelle für „Bestätigung Stapler A“ transferiert, so dass im Logistikscenario Stapler A die Kommissionierung durchführen kann. Analog ist ein Verhalten für Stapler B implementiert.

6 Zusammenfassung

Gerade die Baustellenlogistik stellt besonders hohe Anforderungen an die Qualität ihrer logistischen Prozesse, da u.a. eine Sicherstellung einer kontinuierlichen Materialverfügbarkeit das Zusammenspiel sowohl technischer als auch Software-basierter Komponenten erfordert. Es ist eine kontinuierliche Steuerung und Überwachung der Prozesse und Abläufe von Wichtigkeit, damit u.a. jederzeit der aktuelle Projektstatus ermittelt werden kann. Aufgrund einer steigenden Komplexität und wirtschaftlicher Interessen der beteiligten Akteure im Baubereich ist ein zentrales Server-Konzept, bei dem alle relevanten Daten auf einem zentralen Rechner gespeichert werden, nur bedingt geeignet. Vielmehr ist im Rahmen dieser Ausarbeitung ein dezentrales Konzept vorgestellt worden, bei dem den relevanten Akteuren im Baustellenbereich (Software-)Agenten zur Entscheidungsunterstützung und Planung bzw. Steuerung der Materialflussprozesse zur Verfügung gestellt werden. Die Agenten, die in ihrer Gesamtheit ein MAS bilden, haben sowohl eigenes lokales Fachwissen, als auch ein Bild ihrer Umwelt und ein Datenmodell der aktuellen Systemzustände. Dieses Bild der Umwelt ist mit Hilfe von verteilten Petri-Netzen dargestellt worden, die im Falle eines Nichtdeterminismus durch die jeweils verantwortlichen Agenten gesteuert werden können. Es ist ausschnittsweise gezeigt worden, wie mit Hilfe einer Multiagentensimulation auf Basis von Petri-Netzen ein komplexer Materialfluss im Baubereich gesteuert werden kann. Weiterhin ist erklärt worden, wie eine Agentensimulation im Vorfeld einer Agentenimplementierung auf PDAs der Akteure, die beschriebenen Modelle ausreichend validiert.

7 Ausblick

Aktuell wird die oben beschriebene Agentensimulation über ein reales Multiagentensystem auf Basis einer PDA/Smartphone-Kommunikation implementiert und befindet sich in einem fortgeschrittenen Stadium. Hierbei ist jeweils ein PDA (bzw. Smartphone) ein Agent und für einen gewissen Teil eines komplexen Baustellenszenarios verantwortlich, der jeweils Teilausschnitt eines

komplexen (zentralen) Petri-Netzes ist. Aufgabe der Agenten ist es, die nichtdeterministischen Situationen im Petri-Netz zu verhandeln. Impulse und Prioritäten zur Entscheidungsfindung der Agent werden manuell vom jeweiligen Bereichsleiter des Baustellenszenarios in den Agenten eingegeben. Die aktuelle Entwicklung erfolgt in Form einer „App“ auf Android-basierten Smartphones zur dezentralen Steuerung eines Baustellenszenarios.

Literatur

- Baumgarten, B.: Petri-Netze - Grundlagen und Anwendungen. 2. Aufl. Heidelberg [u.a.]: Spektrum Akad. 1996.
- Chavez, A.; Maes, P.: Kasbah: An Agent Marketplace for Buying and Selling Goods. In Cabtree, B.; Jennings, N (Eds.): Proc. of the First International Conference on the Practical Application of Intelligent Agent and Multi-Agent-Technology (PAAM '98). The Principal Agent Company Ltd: Blackpool, 1996, S. 75-90
- Clausen, U. (Hrsg.): Baulogistik - Konzept für eine bessere Ver- und Entsorgung im Bauwesen, Auflage: 1: Praxiswissen 2006
- Dangelmaier, W.; Gajewski, T.; Pape, U.; Rütter, M.: Supply Chain Chain Management: Grundlagen, Konzepte, Anwendungen, Deutscher Universitätsverlag: Wiesbaden 2004.
- Falk, J.: Ein Multi-Agentensystem zur Transportplanung und -steuerung bei Speditionen mit Trampverkehr, Universität, Fachbereich Wirtschaftsinformatik, Dissertation 1995
- Ferber, J.: Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence, Harlow: Addison Wesley Longman 1999
- Fischer, K.; Müller J. P.; Pischel, M.; Schier, D.: A Model for Cooperation Transportation Scheduling. In: Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent-Systems (ICMAS 95). San Francisco, 1995, S. 109-116
- Främling, K.; Holmström, J.; Ala-Risku, T.; Kärkkäinen, M.: Product Agents for Handling Information about Physical Objects; Research Report, Helsinki University of Technology 2003
- Franke, H.: Eine Methode zur unternehmensübergreifenden Transportdisposition durch synchron und asynchron kommunizierende Agenten. Universität Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2004
- Franke, H.; Matteoschat, S.: Dezentrale Produktionsablaufplanung mittels Agentensimulation: 11. Paderborner Frühjahrstagung - Nachhaltigkeit in flexiblen Produktions- und Liefernetzwerken, 04/2009
- Fraunhofer IML: Materialfluss-Systeme mit künstlicher Intelligenz steuern, LOGISTIK für Unternehmen, Ausgabe 10/2004, S. 28
- Grolik, S.; Stockheim, T.; Wendt, O.; Albayrak, S.; Fricke, S.: Dispositive Supply Web-Koordination durch Multiagentensysteme. In: Wirtschaftsinformatik 2, 2001, S.143-155
- Henseler, H.: Aktive Ablaufplanung mit Multi-Agenten, Vol 180. Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz, Akademische Verlagsgesellschaft: Berlin 1998
- Jennings, N. R.: Agent-Oriented Software Engineering, Proc. 12th Int Conf on Industrial and Engineering Applications of AI, Cairo, Egypt, 4-10. (Invited paper) [Also appearing in Proc. 9th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World (MAAMAW-99), Valencia, Spain 1-7 (Invited paper)]

- Klügl, F.: Multiagentensimulation – Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen. München: Addison-Wesley 2001.
- Kugler, M.: „Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation“, Schriftenreihe Bauwirtschaft, Institut für Bauwirtschaft IBW, Uni Kassel 2012
- Kummer, O.; Wienberg, F.; Duvigneau, M.; Schumacher, J.; Köhler, M.; Moldt, D.; Rölke, H.; Valk, R.: An extensible editor and simulation engine for Petri nets: Renew. In Jordi Cortadella and Wolfgang Reisig, editors, Applications and Theory of Petri Nets 2004. 25th International Conference, ICATPN 2004, Bologna, Italy, June 2004. Proceedings, volume 3099 of Lecture Notes in Computer Science, pages 484-493, Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2004.
- Leszák, M.; Eggert, H.: Petri-Netz-Methoden und –Werkzeuge – Hilfsmittel zur Entwurfsspezifikation u. -validation von Rechensystemen, Berlin [u.a.]: Springer 1989
- Lüth, T.: Technische Multi-Agenten-Systeme – Verteilte autonome Roboter- und Fertigungssysteme. München [u.a.]: Carl Hanser 1998.
- Mannmeusel, T.: Ein verteilter Ansatz zur operativen Produktionsplanung auf der Basis eines Multiagenten-Systems. In: Klauck, C.; Müller, J. (Hrsg.): Künstliche Intelligenz und verteilte PPS-Systeme; Bericht Nr. 5/95, Universität Bremen 1995.
- Perdomo-Rivera, J.: A framework for a Decision Support Model for Supply Chain Management in the Construction Industry. - Blacksburg, Virginia, 2004, zitiert in (Schenk et al. 2006).
- Reisig, W.: Petrinetze, Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien, 1. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Taubner 2010
- Schenk, M.; Plate, C.; Richter, K.; Linke, D.: Logistische Prozesssicherheit auf industriellen Baustellen - Einsatz von Radio Frequenz-Technologien und Telematik zur Produktivitätsverbesserung im Anlagenbau, Tagungsband, 12. Magdeburger Logistiktagung, 16.09.2006
- Sonderforschungsbereich 637: Selbststeuerung logistischer Prozesse, Universität Bremen 2004
- Szirbik, N.: A Negotiation Enabling Agent Based Infrastructure: Composition and Behavior. In: Information Systems Frontier, Volume 4, Issue 1. 2002 S. 85-99
- ten Hompel, M.: Die Marktstudie »RFID 2004 Logistiktrends für Industrie und Handel«: Praxiswissen 2006
- van Parunak, H.; VanderBok, R. S.: Modeling the Extended Supply Network, Working paper, Industrial Technology Institute, Ann Arbor, USA, 1998.
- Windischbauer, T.: Kollaborative Supply-Chain-Execution in heterarisch koordinierten Logistiknetzwerken auf Basis von mobilen Agentensystemen. Linz, 2001
- Zimmermann, R.; Butscher R.: Agentenbasierte Auftragsüberwachung in Supply-Chains, in: Arbeitspapier Wirtschaftsinformatik II Nr. 04/2002, Universität Erlangen-Nürnberg [Hrsg.], Nürnberg, 2002
- Zimmermann, R.; Paschke, A.: PAMAS – an Agent-based Supply Chain Event Management System. In: Proc. Of Americas Conf. on Information Systems 2003.