

Baubetriebliches Vorgehensmodell zur Integration von Multiagentensimulation und Ergonomie für Montageprozesse auf Baustellen

Workflow Model in Construction Management for the Integration of Multi-agent Simulation and Ergonomics in Production Processes on Construction Sites

Matthias Bergmann
TU Darmstadt, Institut für Baubetrieb, Darmstadt (Germany)
m.bergmann@baubetrieb.tu-darmstadt.de

Abstract: The following article describes a workflow model for multi-agent simulation that meets the requirements of the construction industry. The created workflow model consists of two phases which should be executed by experts of different domains. Through the integration of ergonomic aspects the simulation achieves a higher precision in the forecast of the performance of building workers in order to predict the construction progress. The application of the multi-agent simulation raises the efficiency of simulation in the construction industry because a multi-agent model is flexible enough to be applied for different projects. It is shown that the use of multi-agent simulation following the given workflow model can be used for scenario-based risk analysis and optimization during operations scheduling.

1 Einführung

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Verbesserung der Effizienz und Effektivität der Planung und Steuerung von Terminen und Ressourcen für Montageprozesse auf Baustellen durch Einsatz eines Vorgehensmodells zur Integration von ergonomischen Aspekten in ein agentenbasiertes Simulationsmodell der Montageprozesse. Die Effizienz der Planung und Steuerung wird verbessert, indem das Simulationsmodell der Montageprozesse mehrfach eingesetzt wird, an das jeweilige Projekt anpassbar ist und Varianten des Ressourceneinsatzes abbilden kann. Die Effektivitätssteigerung ist dadurch möglich, dass ergonomische Einflussfaktoren berücksichtigt und so die Rahmenbedingungen der Montageprozesse genauer abgebildet werden.

Dabei sind die Besonderheiten der Montage sowie der Montageplanung in der Bauindustrie in Abgrenzung zur stationären Industrie zu beachten. So ist das Ergebnis der Baumontage stets ein Unikat, das unter veränderlichen Randbedingungen erstellt

wird, weshalb im Bauwesen jeder Montageprozess neu geplant werden muss. Im Unterschied zur stationären Industrie befindet sich die Baustelle stets am Bestimmungsort des Objektes, d.h. der Ort der Montage ist im Bauwesen veränderlich. Außerdem werden in den Planungsprozessen der stationären Industrie die Arbeitsplätze mit entwickelt, während auf die Gestaltung der Arbeitsplätze bei der Planung eines Bauwerks in der Regel keine Rücksicht genommen wird. Daraus ergeben sich für die Montagearbeiten im Bauwesen unter anderem Witterungseinflüsse sowie ungünstige Arbeitspositionen als spezifische ergonomische Belastungen. Zudem beträgt die Dauer einer Montagebaustelle ein Vielfaches der Dauer üblicher Montage bei der Serienproduktion in der stationären Industrie und muss deshalb während der Ausführung gesteuert werden.

2 Ein baubetriebliches Vorgehensmodell für die agenten- und ergonomiebasierte Simulation

Die Erhöhung der Effizienz und Effektivität der Terminplanung und -steuerung in der Bauindustrie erfordert die Verfügbarkeit eines lauffähigen Simulationsmodells für die Arbeitsvorbereitung und Kontrolle der Leistungserstellungsprozesse bei Bauvorhaben. Dieses Modell soll die technologische Abfolge und den Ressourceneinsatz sowie die Auswirkungen der ergonomischen Einflussfaktoren abbilden. Dadurch liefern die Simulationsexperimente nach Aufstellen entsprechender Szenarien eine präzisere Prognose des Baufortschritts und Ressourceneinsatzes als die Terminplanung mit gemittelten Aufwandswerten.

Dazu ist eine agentenbasierte Simulation besonders geeignet, da Agenten dynamische Wechselwirkungen von Individuen und ihrer Umwelt optimal abbilden (KLÜGL 2001, S. 16 ff.). Außerdem existieren bereits vielversprechende Ansätze zur Integration der Geometrie von Bauwerken auf Basis von CAD-Daten in ein Multiagentenmodell (KUGLER 2009).

Die Anwendung bestehender Vorgehensmodelle (OECHSLEIN 2004, S.51 ff.) auf die Bauablaufsimulation erscheint nicht erfolgversprechend, da sie die Anforderungen der Bauindustrie nicht berücksichtigen. Insbesondere sehen die existierenden Vorgehensmodelle oft vor, dass die Modellierung und Experimentation in einer Hand liegen. Dies ist in der Bauindustrie nicht zielführend, da die Simulation während der oft sehr kurzen Phase der Arbeitsvorbereitung vor Projektbeginn durch Domänenexperten des Baubetriebs durchgeführt werden muss.

Zur Umsetzung der oben genannten Ziele und Defizite wurde ein Vorgehensmodell aufgestellt, das die Integration baubetrieblicher und arbeitswissenschaftlicher Forschung mit der rechnergestützten Multiagentensimulation ermöglicht und die Anforderungen der Bauindustrie an ein solches Software-Werkzeug befriedigt (siehe Abb. 1). Grundsätzlich besteht das unten abgebildete Vorgehensmodell aus zwei Stufen, die von Experten mit unterschiedlichen fachlichen Qualifikationen auszuführen sind. Das Aufstellen eines lauffähigen und kalibrierten Multiagentenmodells der Bauabläufe kann am effizientesten durch Simulationsexperten von Seiten der Software-Anbieter übernommen werden, die dann der Bauindustrie das lauffähige Modell anbieten.

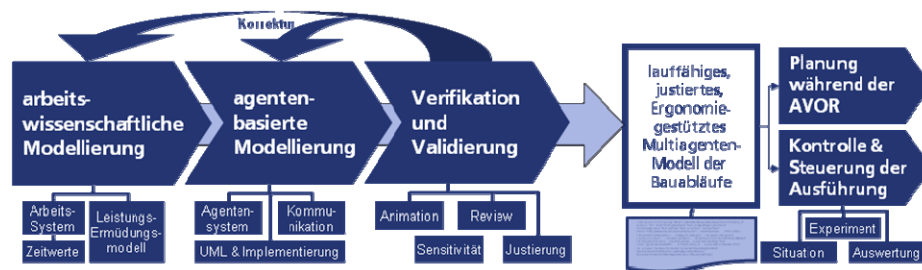


Abbildung 1: Zweistufiges Vorgehensmodell für die ergonomiegestützte Multiagentensimulation im Baubetrieb

In der ersten Stufe wird durch Simulationsexperten ein arbeitswissenschaftliches Modell der Montageprozesse aufgestellt und in ein lauffähiges Multiagentenmodell transformiert, das dann einer Verifikation und Validierung zu unterziehen ist. Wichtig ist dabei die Aggregation der REFA-Lehre, bestehend aus Arbeitssystem und Zeitaufnahmetechnik, der ergonomischen Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Arbeitskräften und der Modellierungstechniken für Multiagentensysteme.

In der zweiten Stufe sollten in den Unternehmen der Bauwirtschaft Domänenexperten des Baubetriebs das Modell als Hilfsmittel in der Arbeitsvorbereitung und im Controlling einsetzen, indem sie bauprojektsspezifische Situationen aufstellen und per Experiment detaillierte Prognosen über den Bauablauf gewinnen. Die Situationen stellen dabei eine Variation des allgemeinen Bauablaufmodells dar, in dem die Werte für die ergonomischen Parameter festgelegt werden.

Bauablaufprognosen für unterschiedliche Ausgangssituationen können in der Arbeitsvorbereitung dazu dienen, optimale Ressourcenkonstellationen zu identifizieren oder eine Risikoanalyse hinsichtlich Witterung oder Ressourcenausfall durchzuführen. Im Rahmen der Kontrolle des Baufortschritts liefern Simulationsexperimente automatisiert Soll-Termine sowie Fertigstellungsprognosen basierend auf aktuellen Baustellendaten und können bei der Abweichungsanalyse verschiedene Thesen überprüfen.

3 Agenten- und ergonomiebasierte Modellierung

Die arbeitswissenschaftliche Modellierung für baubetriebliche Zwecke muss die Struktur und Randbedingungen von Bauprozessen abbilden. Für die Aufstellung eines Multiagentenmodells sind hierzu die Elemente des REFA-Arbeitssystems (SCHLICK u.a. 2010, S. 35) in dessen Entitäten zu überführen. Neben der Umwelt mit eigenem Verhalten, eigenen Zustandsvariablen und einem Abbild von Raum und Zeit sowie Ressourcen zur Modellierung von passiven Objekten wie Arbeitsgegenstände stehen die Agenten im Fokus. Das Verhalten der Agenten soll den Arbeitsablauf abbilden und lässt sich als Aktivitätsdiagramm darstellen.

Außer der Ausführung von Tätigkeiten umfasst das Agentenverhalten auch die Aufnahme und Verarbeitung von Informationen sowie die Kommunikation mit anderen Agenten, so dass auch kooperative Bauprozesse und Einflüsse durch die Umgebung modelliert werden können. Die Kommunikationsfähigkeit der Agenten wird genutzt, um eine dynamische Zusammenarbeit von Montage- und Transportagenten zu

ermöglichen und um die verschiedenen Bauzustände eines Arbeitsgegenstands unter den Arbeitskräften auszutauschen. Durch diese Modellierung, bei der sowohl die Verfügbarkeit von Ressourcen als auch die Erfüllung technischer Vorbedingungen den Montagefortschritt bedingt, werden kapazitive und technologische Anordnungsbeziehungen im Simulationsexperiment automatisch berücksichtigt.

Im Kern geht es bei der baubetrieblichen Simulation darum, das Leistungsangebot einer Arbeitskraft zu jedem Zeitpunkt zu bestimmen. Dazu müssen die inneren und äußeren Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit einer Arbeitskraft modelliert werden. Hierzu wurde das Belastungs-Beanspruchungsmodell nach ROHMERT (1984), in dem die Beanspruchung einer Arbeitskraft von den einwirkenden Belastungen und ihren individuellen Eigenschaften abhängt, erweitert und im Hinblick auf die baubetriebliche Multiagentensimulation modifiziert. Dabei wird das Leistungsangebot als dynamische Variable, die von verschiedenen Beanspruchungen sowie der Ermüdung der Arbeitskraft abhängt, modelliert. Die Ermüdung stellt wiederum eine dynamische Variable dar, deren Wert bei Tätigkeiten mit ermüdender Beanspruchung ansteigt und durch Erholzeiten wieder gesenkt wird. Das baubetriebliche Leistungs-Ermüdungsmodell formuliert die Zuordnung der Belastungen und Eigenschaften zu den Entitäten des Multiagentenmodells sowie deren Auswirkungen auf das Leistungsangebot und die Ermüdung plus die Zusammenhänge zwischen Ermüdung, Erholzeit, Leistungsangebot und Grundzeit (siehe Abb. 2).

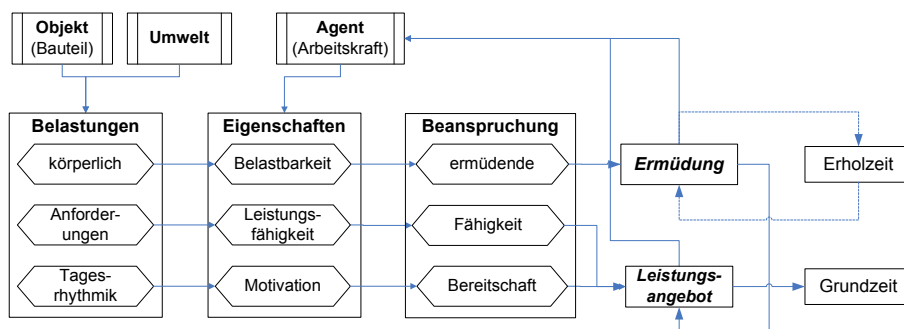


Abbildung 2: Leistungs-Ermüdungsmodell und Multiagentenmodell

Durch die Implementierung des Leistungs-Ermüdungsmodells innerhalb der Multiagentensimulation ist es möglich, die Eigenschaften jeder einzelnen Arbeitskraft den Belastungen aus Arbeitsaufgabe und Arbeitsumgebung dynamisch gegenüberzustellen, um so die aktuellen individuellen Beanspruchungen zu bestimmen. Aus den Beanspruchungen und der Ermüdung ergibt sich dann das zeitlich veränderliche Leistungsangebot, aus dem die Dauer der Grundzeit eines Arbeitsvorgangs resultiert. Besondere Bedeutung kommt der Modellierung der zur Ermüdung führenden körperlichen Belastung aus Arbeitsumgebung und Arbeitsaufgabe zu. Bei Bauarbeiten ohne Witterungsschutz stellt beispielsweise die Außentemperatur einen maßgeblichen Einfluss der Arbeitsumgebung dar. Die Ermüdung erzeugende Belastung aus der Arbeitsaufgabe setzt sich bei motorischen Tätigkeiten aus dem Kraftaufwand und der einzunehmenden Arbeitsposition zusammen.

Der Beginn und die Dauer der Erholzeit hängen von der Höhe der Ermüdung ab, die wiederum durch die Dauern und Höhen der Ermüdungsbeanspruchungen seit der

letzten Erholpause bestimmt wird. Zum Ende jeder Montage wird ermittelt, ob die Arbeitskraft eine Erholpause beginnt, wobei die Wahrscheinlichkeit einer Pause umso höher ist, je größer der aktuelle Ermüdungswert ist. Die Erholzeit dauert in diesem Modell solange, bis die Ermüdung vollständig abgebaut wurde.

4 Einsatzbeispiel für die baubetriebliche Multiagentensimulation

Das Vorgehensmodell wurde für die Simulation der Montageprozesse eines modularen Fassadensystems eingesetzt und dadurch überprüft. Wichtige Aspekte bei der Modellierung waren die Transport- und Montageprozesse, die Kooperation und Kommunikation von Monteuren und Transportgeräten, die bedarfsgerechte Anlieferung der Fertigteile sowie die Modellierung der Baustellenbedingungen.

Im vorliegenden Fall einer Fassadenmontage arbeitet ein Monteurer von einer Hubarbeitsbühne aus mit einem Teleskopstapler als Transportgerät zusammen, um die bis zu 9 Meter hohen Fassadenmodule an einer bestehenden Außenwand zu befestigen. Die Simulation erfolgt mit dem SeSam-Simulator (LEHRSTUHL FÜR KÜNSTLICHE INTELLIGENZ UND ANGEWANDTE INFORMATIK), der u.a. die grafische Darstellung der Simulationsläufe ermöglicht (siehe Abb. 3).

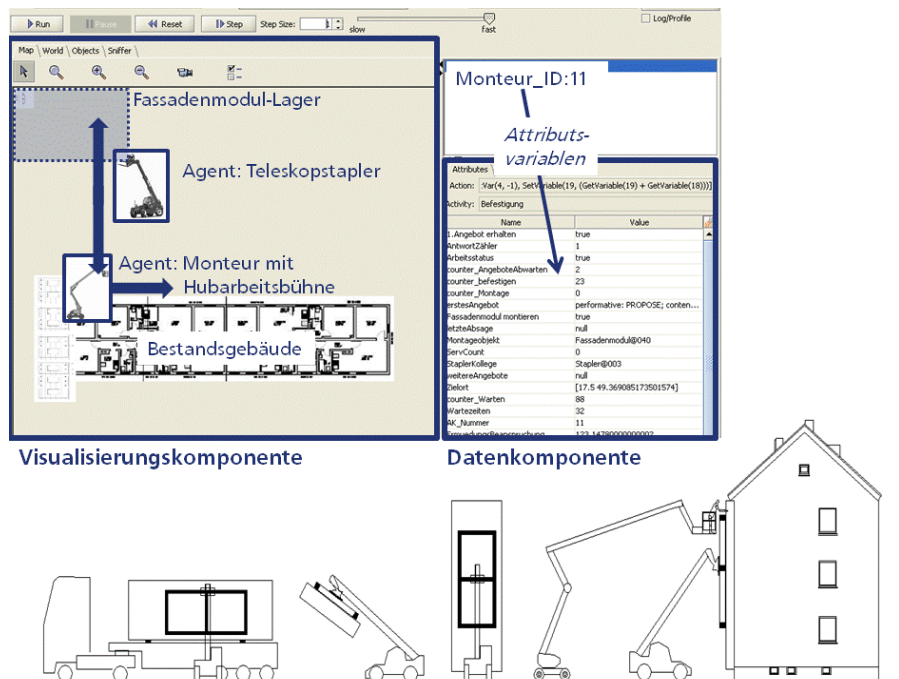


Abbildung 3: Schema zum Montageablauf und Darstellung eines Simulationsexperiments in SeSam

Auf Basis des agenten- und ergonomiebasierten Modells kann beispielsweise die optimale Zusammensetzung einer Kolonne aus Monteuren und Transportgeräten

ermittelt werden. Hierzu werden unterschiedliche Stereotypen von Arbeitskräften und eine unterschiedliche Anzahl und Zusammensetzung der eingesetzten Ressourcen verglichen. An den unten dargestellten Aufwandswerten und Gesamtdauern für vier unterschiedliche Kolonnenzusammensetzungen kann man erkennen, dass eine gleichzeitige Optimierung des Aufwands und der Gesamtdauer nicht immer möglich ist und dass die Leistung von den eingesetzten Arbeitskräften respektive deren Stereotypen abhängt (siehe Abb. 4). Die Stereotypen der Arbeitskräfte unterscheiden sich dabei hinsichtlich ihrer körperlichen Belastbarkeit, ihrer Motivation sowie ihrer Erfahrung und fachlichen Qualifikation. Als Beispiel für zwei Arbeitskräfte mit unterschiedlichen ergonomischen Eigenschaften werden hier ein unerfahrener, unqualifizierter Hilfsarbeiter und ein erfahrener, gut ausgebildeter Facharbeiter, deren Motivation und körperliche Belastbarkeit identisch sind, gegenübergestellt.

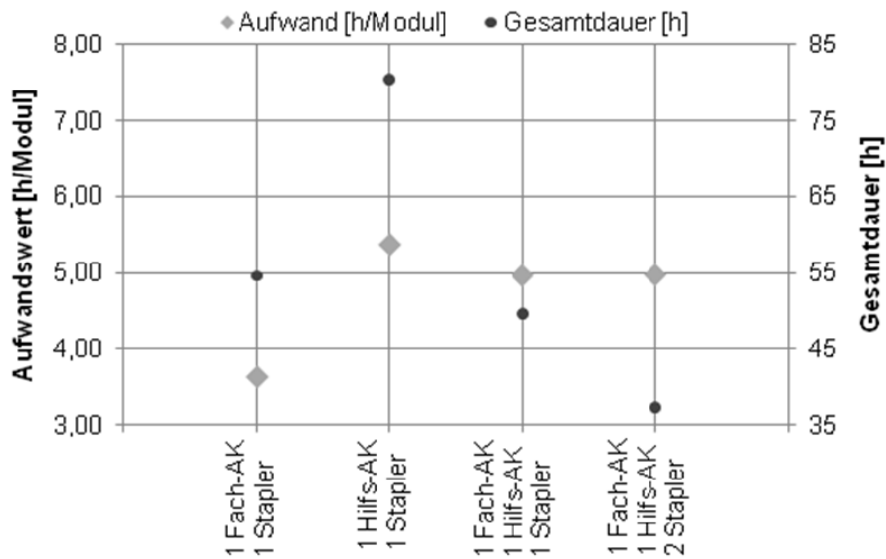


Abbildung 4: Aufwandswerte und Gesamtdauer unterschiedlicher Szenarien zur Kolonnenzusammensetzung

Daneben kann auch der zeitliche Verlauf der Ermüdung einzelner Arbeitskräfte analysiert werden. Dadurch werden die Wechselwirkungen zwischen den Eigenschaften und Belastungen sowie dem Leistungsangebot der Arbeitskräfte deutlich. Beispielhaft ist unten der Verlauf des Leistungsangebots einer Arbeitskraft während eines Arbeitstags in Relation zu den Teilbeanspruchungen und der Ermüdung dargestellt (siehe Abb. 5). Der sprunghafte Verlauf des Leistungsangebots resultiert dabei aus der Implementierung, bei der nur zu Beginn jeder Tätigkeit das Leistungsangebot als Grundlage für die Bestimmung der Tätigkeitsdauer berechnet wird. Die zeitliche Veränderung der Ermüdung resultiert aus Phasen ermüdender und nicht ermüdender Tätigkeit sowie Erholpausen.

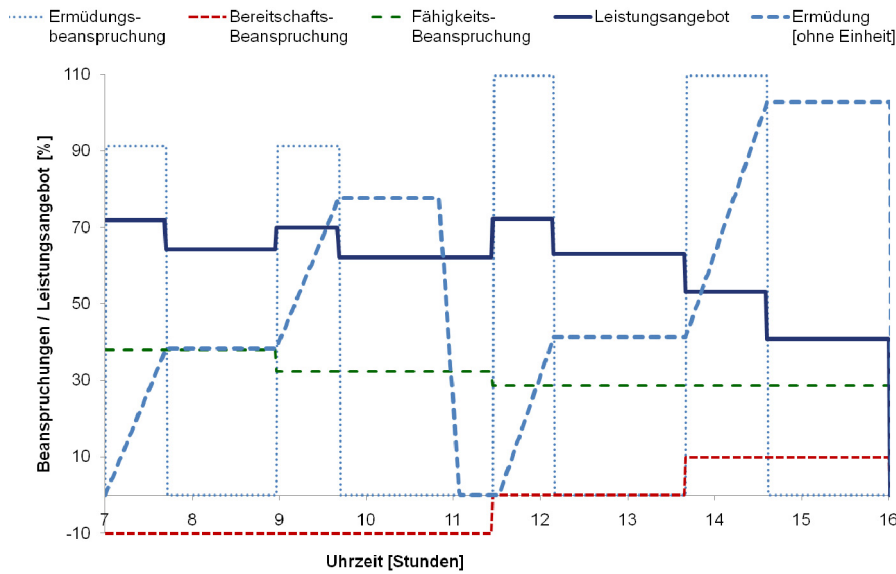


Abbildung 5: Verlauf der Teilbeanspruchungen, der Ermüdung und des Leistungsangebots einer Arbeitskraft während eines Arbeitstags

5 Fazit

Das baubetriebliche Vorgehensmodell zur Integration von Multiagentensimulation und Ergonomie für Montageprozesse auf Baustellen stellt einen Beitrag zur Einführung der Multiagentensimulation in der Bauindustrie dar. Es bietet eine Struktur zur multiagentenbasierten Simulation von Montageprozessen, die eine Arbeitsteilung im Sinne der Baupraxis ermöglicht und konkrete Anwendungsfälle der Multiagentensimulation in der Arbeitsvorbereitung aufzeigt. Dabei wird insbesondere ausgenutzt, dass mit Hilfe eines Simulationsmodells durch Experimente mit variierenden Parametern rasch eine Vielzahl von Varianten des Baufortschritts generiert werden kann.

Zugleich werden die Erkenntnisse der Ergonomie für den Baubetrieb nutzbar gemacht, da sie in das Simulationsmodell integriert wurden und so ohne großen Aufwand anwendbar sind. Die Einarbeitungs- und Einübungseffekte, die Auswirkungen von Motivation und Qualifikation sowie die Einflüsse der Ermüdung infolge Witterungsbedingungen und Schwere der Arbeitsaufgabe fließen in die Terminprognose ein. Damit kann die Multiagentensimulation einen Beitrag zur Erhöhung der Effizienz und Effektivität der Planung und Steuerung von Terminen und Ressourcen im Bereich der Bauausführung leisten.

Zukünftig wird es darüber hinaus das Ziel sein, die Multiagentensimulation mit der Sensorik und einem regelbasierten System zu verknüpfen, um eine zeitnahe Kontrolle und Steuerung von Bauprozessen implementieren zu können (MOTZKO u.a. 2010). Zugleich ist es notwendig, das ergonomiebasierte Multiagentenmodell zu kalibrieren, wofür digitale Baustellendaten besonders geeignet erscheinen.

Literatur

- BERGMANN, Matthias; MOTZKO, Christoph: Ergonomiegestützte Multiagentensimulation im Baubetrieb. In: Bauportal, München, 122(2010)5, S. 34-37.
- KLÜGL, Franziska: Multiagentensimulation – Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen. München: Addison-Wesley Verlag, 2001.
- KUGLER, Martin: Prozessdatenmodell für die Simulation im Hochbau. In: Tagungsband zum 20. Assistententreffen der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik. Kassel: Schriftenreihe Bauwirtschaft, 2009.
- LEHRSTUHL FÜR KÜNSTLICHE INTELLIGENZ UND ANGEWANDTE INFORMATIK, Universität Würzburg: SeSAm - Multi-Agent Simulation Environment. <http://www.simsesam.de>, Stand: 22.07.2010.
- MOTZKO, Christoph; MEHR, Oliver; BERGMANN, Matthias: Echtzeitsteuerung von Bauprozessen. In: Die wirtschaftliche Seite des Bauens. Hrsg.: Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb, Prof. Wanninger. Braunschweig: Schriftenreihe des Instituts für Bauwirtschaft und Baubetrieb, Heft 50, 2010, S. 515-523.
- OECHSLEIN, Christoph: Vorgehensmodell mit integrierter Spezifikations- und Implementierungssprache für Multiagentensimulationen. Aachen: Shaker Verlag, 2004.
- ROHMERT, Walter: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. Köln, 38(1984)4, S. 193-200.
- SCHLICK, Christopher; BRUDER, Ralph; LUCZAK, Holger: Arbeitswissenschaft. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.