

CiSmo – CAD-integrierte Simulationsmodellierung für die Bauablaufsimulation im Hochbau

CiSmo – CAD-integrated Simulation Modelling for the Simulation of Construction Sequences

Martin Kugler, Volkhard Franz
Universität Kassel, Kassel (Germany)
m.kugler@uni-kassel.de, vfranz@uni-kassel.de

Abstract. This paper presents the simulation modelling environment "CiSmo". The simulation environment was developed in the course of a research project supported by the German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft - DFG). CiSmo provides several application-windows within the CAD-environment Architecture from Autodesk. The application-windows enable the creation of agent-based simulation models by using the data contained in the CAD-model of the building (i.e. coordinates, masses and material of the building components). The simulation model is intended to generate a prediction of the construction progress under defined circumstances. Additional data for the parameterisation and modelling of the simulation model, like for instance the building site facilities, can be added by using the application windows. The paper explains the used process model and the structure of the agent-based simulation model.

1 Einleitung

CAD-Modelle von Gebäuden beinhalten als zentrales Planungsdokument im Hochbau Daten, die auch in der Ausführungsplanung verwendet werden. So kann beispielsweise die Baustelleneinrichtung oder die Mengenermittlung für die Terminplanung auf der Basis von CAD-Dokumenten durchgeführt werden. Die Bedeutung von CAD-Modellen für die Parametrisierung von Simulationsmodellen wurde schon von verschiedenen Forschern erkannt und in erfolgreichen Forschungsarbeiten umgesetzt. WEBER (2007) implementierte eine CAD-Schnittstelle für die Simulation der Baustellenlogistik, mit deren Hilfe CAD-Daten als Systemlast für Simulationsmodelle in einer Datenbank gespeichert wurden. CHAHROUR (2007) entwickelte ein CAD-integriertes Simulationssystem für den Tiefbau, das im CAD-System über ein simulationsspezifisches Produktmodell CAD-Daten und weitere simulationsrelevante Parameter erfasst.

Das in diesem Artikel vorgestellte Simulationswerkzeug CiSmo dient der Unterstützung der Aufgaben der Arbeitsvorbereitung im Hochbau. Es ermöglicht eine syste-

matische Prüfung der Terminplanung, der Baustelleneinrichtung und des Ressourceneinsatzes im Rahmen von Simulationsstudien. Parametrisiert werden können die Simulationsmodelle sowohl mit stochastischen wie auch mit deterministischen Parametern.

2 Das Modellierungswerkzeug

Das Modellierungswerkzeug CiSmo wurde im Rahmen eines von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) unterstützten Forschungsprojekts entwickelt. CiSmo ermöglicht die Erstellung eines Simulationsmodells innerhalb der CAD-Umgebung Architecture von Autodesk. CAD-Systeme stellen für die meisten Ingenieure eine vertraute Arbeitsumgebung dar (vgl. CHAHROUR, 2007 S. 1) und bieten darüber hinaus einen vollumfänglichen Zugriff auf die CAD-Daten. Durch die Integration der Simulationsmodellierung in das CAD-System kann auf eine CAD-Schnittstelle in der Simulationsumgebung verzichtet werden. CiSmo verwendet bauteilorientierte 3-dimensionale CAD-Gebäudemodelle, deren Bauteilen sich zusätzliche Eigenschaftsdatensätze zuweisen lassen. Das Simulationsmodell wird in dem offenen Datenformat XML gespeichert, so dass die für die Simulation benötigten CAD-Daten direkt in das Simulationsmodell übertragen werden. So können beispielsweise die Materialien, die Mengen und die Koordinaten der Bauteile für das Simulationsmodell extrahiert werden.

Über die in Architecture integrierte Programmierschnittstelle VBA (Visual Basic for Applications) wurde das zusätzliche Menüsystem "Simulation" in Architecture integriert. Unter Verwendung dieses Menüsystems lassen sich Anwendungsfenster für die Modellierung und Parametrisierung des Simulationsmodells öffnen. Das Menü gliedert sich in die Untermenüpunkte:

- **Projektbeschreibung:** Hier können allgemeine Angaben zum Projekt eingegeben werden, wie Projektlaufzeit, Feiertage und Arbeitszeiten.
- **Betriebsmitteldefinition:** Dieses Anwendungsfenster dient der Definition der verfügbaren Betriebsmittel, wie Krane, Aufzüge, Schalungen usw.
- **Materialdefinition:** Hier werden alle Materialien definiert, die für den Bauprozesse benötigt werden.
- **Personaldefinition:** In diesem Anwendungsfenster können die benötigten Gewerke und das verfügbare Personal spezifiziert werden.
- **Baustelleneinrichtung:** Dieses Anwendungsfenster dient der Platzierung der Baustelleneinrichtungselemente, wie Kran, Bauaufzug, etc. und der Definition von Bauabschnitten im CAD-Modell.
- **Prozessmodellierung** mit den Untermenüpunkten *Verfahrensauswahl* und *Verfahrensdefinition* (zur Zuordnung von Bauverfahren, Spezifikation der Vorgänge und der Teilvorgänge der Verfahren)
- **Modellgenerierung:** Dieses Anwendungsfenster dient der automatischen Generierung des Simulationsmodells aus den gesammelten Daten.

2.1 Das Prozessmodell

Für die Sequenzierung der Bauprozesse wurde ein eigenes Prozessmodell entwickelt, welches die 3-dimensionale Struktur des Gebäudes und die definierten Bauabschnitte für die Sequenzierung des Bauablaufs verwendet. Dieses Prozessmodell wird über die Anwendungsfenster innerhalb der CAD-Umgebung parametrisiert. Das Prozessmodell definiert Bauverfahren, Vorgänge, Voraussetzungen für die Ausführung der Vorgänge (Abhängigkeitsbeziehungen), Aufwandswerte, Betriebsmittel und die erforderlichen Materialmengen.

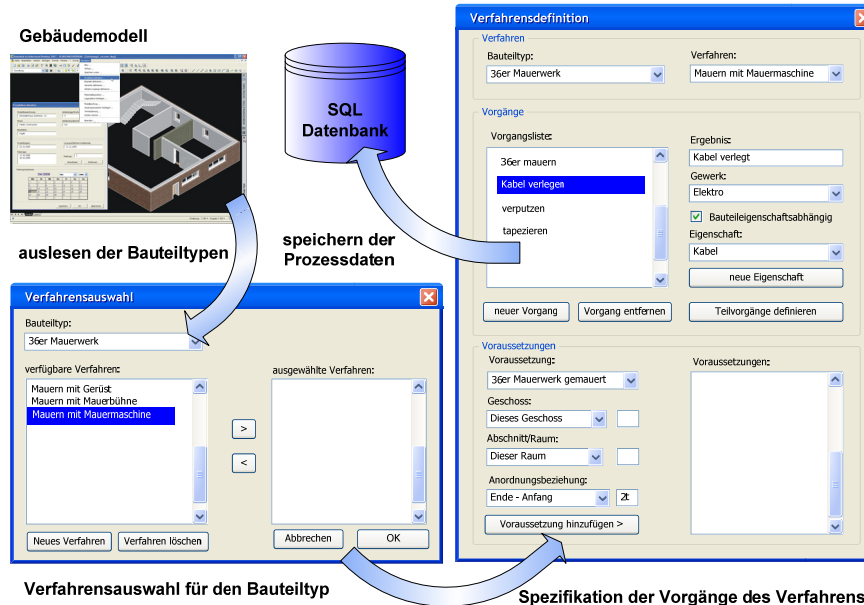


Abbildung 1: Anwendungsfenster zur Verfahrensauswahl und Verfahrensdefinition

Die verschiedenen Bauteile des Gebäudemodells lassen sich jeweils einem bestimmten Bauteiltypen zuordnen. Für jeden Bauteiltypen des Gebäudemodells können verschiedene Verfahren ausgewählt werden (siehe Abb. 1). Diese Verfahren bestehen aus mehreren Vorgängen, die in einem separaten Anwendungsfenster spezifiziert werden. Für jeden der Vorgänge können mehrere Voraussetzungen definiert werden, die erfüllt sein müssen, damit der Vorgang bearbeitet werden kann.

Die Voraussetzungen können durch geometrische und durch zeitliche Relationen zu den Ergebnissen anderer Vorgänge definiert werden. Die räumlichen Relationen beziehen sich auf die Gebäudegeometrie, die im Prozessmodell durch Geschosse, Abschnitte, Räume und Bauteile repräsentiert wird. Die Voraussetzungen beziehen sich dabei aber nur auf die relative Lage des Bauteils zu anderen Bauteilen. Eine absolute Positionsbestimmung (wie z.B. die Decke über dem 1. Geschoss muss betoniert sein, damit das Außenmauerwerk im 2. Geschoss gemauert werden kann), wird nicht vorgenommen. Dadurch ist es möglich, die Voraussetzungen für alle Bauteile eines Bauteiltyps allgemeingültig zu formulieren. Die zeitlichen Relationen werden durch im Projektmanagement übliche Anordnungsbeziehungen (E-A, A-A, A-E, E-E) modelliert.

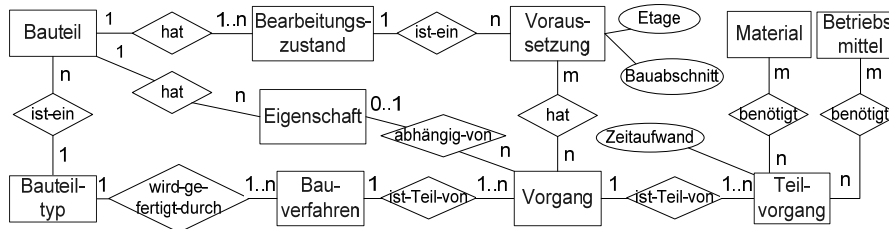


Abbildung 2: Entity-Relationship Diagramm des Prozessmodells

Die Vorgänge bestehen außerdem aus einer frei definierbaren Anzahl an Teilvorgängen. Jedem Teilvorgang können Materialien, Betriebsmittel und ein Zeitaufwandswert zugeordnet werden. Die benötigte Menge und der Zeitaufwand werden jeweils auf eine Mengeneinheit des zu fertigenden Bauteils bezogen (m, m², m³, kg oder Stück). Gespeichert wird das Prozessmodell in einer SQL-Datenbank, auf die sowohl vom CAD-System wie auch von der Simulationsumgebung aus zugegriffen werden kann. Abbildung 2 enthält als Übersicht ein Entity-Relationship Diagramm des Prozessmodells, das als Grundlage für die Implementierung der Datenbank verwendet wurde.

Diese Form der Prozessmodellierung bietet den Vorteil, dass einmal spezifizierte Verfahren bei neuen Projekten wiederverwendet werden können. Die Schnittstelle zwischen Gebäude- und Prozessmodell besteht aus den Bauteiltypen, denen die Verfahren zugewiesen werden, und den Voraussetzungen, bei deren Formulierung Gebäudeeigenschaften mit einbezogen werden. Bei einem neuen Projekt müssen also lediglich die Verfahren den Bauteiltypen zugewiesen werden und die Voraussetzungen aktualisiert und auf ihre Gültigkeit überprüft werden.

3 Das Simulationsmodell

Aufgrund der besonderen Systemeigenschaften einer Baustelle wurde für den Entwurf und die Implementierung des Simulationsmodells ein agentenbasiertes Modellierungskonzept ausgewählt. Als Simulationsumgebung wird das an der Universität Würzburg entwickelte agentenbasierte Simulationsprogramm SeSAM (Shell for Simulated Agent Systems) verwendet. SeSAM bietet sich für die Entwicklung prototypischer Systeme an, da es unter der General Public License (GNU) steht, wodurch der komplette Java-Quellcode des Programms für Weiterentwicklungen verwendet werden kann. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Simulationsmodelle in dem Datenformat XML gespeichert werden und sie dadurch von anderen Anwendungen aus bearbeitet werden können.

Nach WAGNER u.a. (2008) sind agentenbasierte Simulationsmodelle besonders für soziale, technische und sozio-technische Systeme, wie z.B. Verkehrs- und Logistik-Systeme, geeignet. Von KLÜGL u.a. (2002) wurden anhand der Implementierung eines Beispiels vier verschiedene Modellierungstechniken (Warteschlangen-Netze, Petri-Netze, Zellulare Automaten und agentenbasierte Modellierung) miteinander verglichen. Aufbauend auf diesem Vergleich empfehlen KLÜGL u.a. (2002) den Einsatz der agentenbasierten Modellierungstechnik bei folgenden Systemeigenschaften:

- bei inhomogenem Raum (besonders, wenn sich dieser zusätzlich umgestaltet),
- bei Interaktionen mit flexiblen, individuellen Akteuren, deren Beziehungen untereinander dynamisch sind.
- Wenn das Verhalten der Systemkomponenten abhängig von globalen Eigenschaften oder Werten ist.

Betrachtet man das System "Baustelle", spielen alle diese Faktoren eine wichtige Rolle. Der Bauprozess zeichnet sich insbesondere durch viele kleine logistische Prozesse in einem dynamischen, inhomogenen räumlichen Umfeld aus. Nach BOERNERT und BLÖMEKE (2003) nimmt die eigentliche Haupttätigkeit am Gewerk bei einem Ausbauprojekt nur 30,9 % der benötigten Gesamtzeit in Anspruch. Transporttätigkeiten, zurückzulegende Wege, Materialsuche und Auf- und Umräumen nehmen zusammen 29,9 % der gesamten Bauzeit ein. Die Modellierung dieser logistischen Prozesse stellt eine große Herausforderung für die baubetriebliche Simulation dar. Aufgrund der ortsveränderlichen Produktion und den sich schnell wandelnden räumlichen Gegebenheiten auf einer Baustelle ist die Festlegung von Wegnetzen nicht sinnvoll.

Agenten besitzen aufgrund ihres räumlichen Wahrnehmungsvermögens bei der Simulation logistischer Systeme einen Vorteil gegenüber anderen Modellierungskonzepten. Die Agenten können sich im dynamischen räumlichen Umfeld der Baustelle selbstständig orientieren und eine adäquate Wegfindung vornehmen. Das ermöglicht es außerdem, sie in beliebigen Bauprojekten mit ganz unterschiedlichen Grundrissen und Bauzuständen einzusetzen.

Eine weitere Besonderheit des Baugeschehens besteht darin, dass zwar in der Regel eine übergeordnete Bauablaufplanung existiert, die konkrete Arbeit am Bauwerk aber dezentral von einer Arbeitsgruppe organisiert und ausgeführt wird. Die Zusammensetzung der Arbeitsgruppe, die Verfügbarkeit der Ressourcen und die Platzverhältnisse bestimmen mit darüber, wie die Arbeiten vor Ort ausgeführt werden. Eigene Zielstellungen der verschiedenen Arbeitsgruppen können zu gegenseitigen Behinderungen und zu einer Konkurrenz um die vorhandenen Ressourcen führen.

Die Interaktionsfähigkeit der Agenten ermöglicht es, diese Konkurrenzsituation auf der Baustelle nachzubilden. Durch den modularen Aufbau einer agentenbasierten Simulation können Arbeitsgruppen und Betriebsmittel nach den Projekterfordernissen in Ausgangsszenarien für die Simulationsläufe frei miteinander kombiniert werden. Über die Umwelt der agentenbasierten Simulationsmodelle können globale Einflussfaktoren, wie z.B. das Wetter, Arbeitszeiten und Feiertage, in das Modell integriert werden (vgl. KUGLER, FRANZ 2009, S. 188 f.).

3.1 Modellstruktur

Agentenbasierte Simulationsmodelle setzen sich in SeSAm aus drei verschiedenen Modellierungselementen zusammen. Passive Bestandteile des Modells werden als Ressourcen (Resources) modelliert, aktive Bestandteile als Agenten (Agents) und übergeordnetes Systemverhalten wird in die Umwelt (World) des Modells integriert. Zusätzlich lassen sich Ausgangsszenarien (Situations) für Simulationsläufe definieren, in denen die Ressourcen und die Agenten räumlich angeordnet werden können.

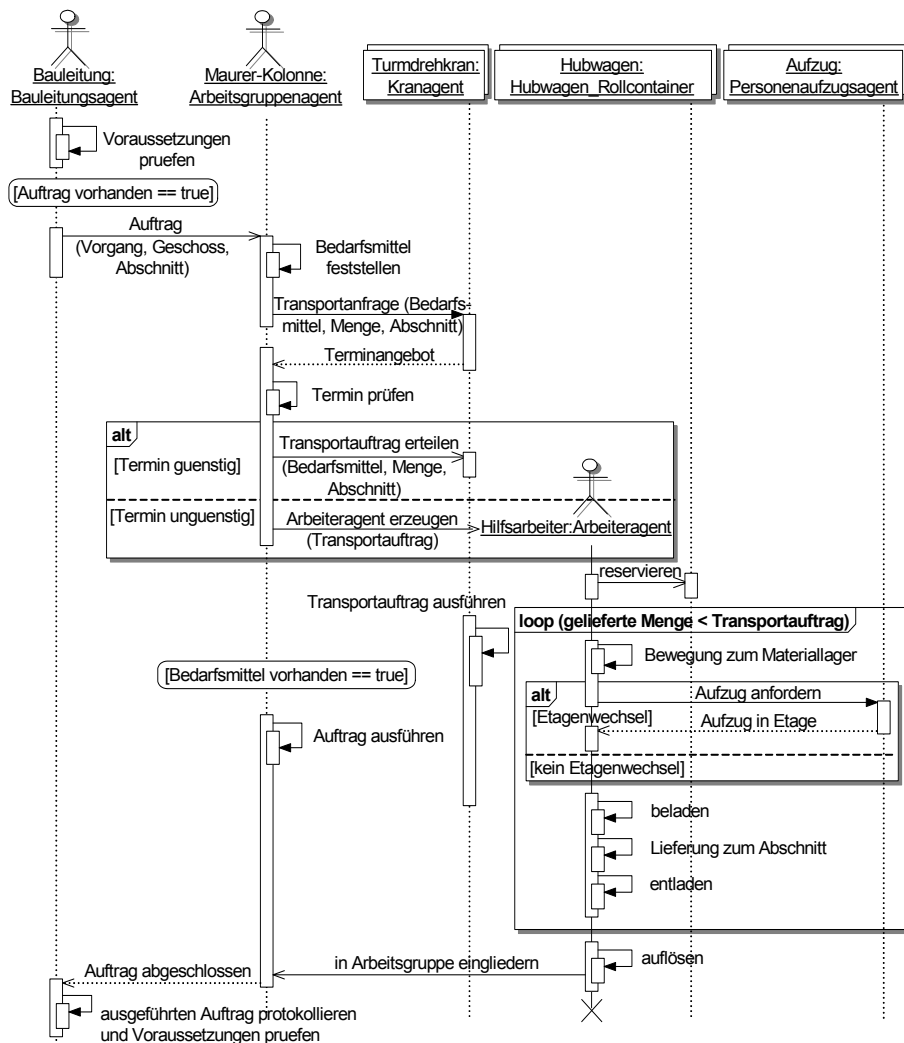


Abbildung 3: UML-Sequenzdiagramm des Nachrichtenaustausches zwischen den Agenten des Simulationsmodells

Das entwickelte agentenbasierte Simulationsmodell setzt sich aus einem Bauleiteragenten, Arbeitsgruppenagenten, Arbeiteragenten und verschiedenen Betriebsmittelagenten zusammen. Das aus dem CAD-System übertragene Gebäudemodell wird durch Bauteile repräsentiert, die als passive Ressourcen in einer "Situation" räumlich angeordnet werden. In der Umwelt des Modells wird die Systemzeit verwaltet, indem die Arbeitszeiten und die Feiertage berücksichtigt werden und es wird der Zugriff auf die externen Daten in der SQL-Datenbank gesteuert.

Der Bauleiteragent organisiert den übergeordneten Bauablauf, indem er an die verfügbaren Arbeitsgruppenagenten Aufträge vergibt (siehe Abb. 3). Um die ausführbaren Aufträge zu identifizieren, greift der Bauleiteragent auf das Prozessmodell in der SQL-Datenbank zu und überprüft gleichzeitig den Bearbeitungszustand der

Bauteile im Gebäudemodell des Simulationsmodells. Für jeden Bauabschnitt wird für die dort auszuführenden Vorgänge überprüft, ob alle Voraussetzungen für die Ausführung der Vorgänge erfüllt sind. Ist eine Arbeitsgruppe verfügbar, die für die Ausführung eines Vorgangs qualifiziert ist, wird an diese der Auftrag für die Ausführung des Vorgangs vergeben. Der Auftrag beinhaltet als Information den Arbeitsvorgang sowie den Abschnitt und das Geschoss, in dem der Vorgang ausgeführt werden soll.

Der Arbeitsgruppenagent wiederum organisiert die Ausführung des Auftrags, indem er Transportanfragen an Betriebsmittelagenten (z.B. einen Turmdrehkran) stellt, Betriebsmittel reserviert oder Transportaufträge an Mitglieder der eigenen Arbeitsgruppe (Arbeiteragenten) vergibt.

Geht bei einem Betriebsmittelagenten eine Transportanfrage ein, so berechnet dieser aufgrund der eigenen Leistungsdaten und der aktuellen Auftragslage den frühestmöglichen Lieferzeitpunkt und teilt diesen Zeitpunkt als Terminangebot dem Arbeitsgruppenagenten mit. Aus den eingehenden Terminangeboten wählt der Arbeitsgruppenagent das frühest mögliche Angebot aus. Ist der Transport per Hubwagen oder Rollcontainer durch Mitglieder der eigenen Arbeitsgruppe zeitlich sinnvoller, so wird ein Transportauftrag an Mitglieder der eigenen Arbeitsgruppe (Arbeiteragenten) vergeben.

Ist genügend Material am Fertigungsort vorhanden, wird von dem Arbeitsgruppenagent die Ausführung des Vorgangs an den Bauteilen des Abschnitts gestartet. Zeitgleich mit der Bearbeitung eines Bauteils können einzelne Mitglieder der Arbeitsgruppe damit beauftragt werden, weiteres Material für den Fortgang der Arbeiten zu beschaffen.

Die erfolgreiche Ausführung eines Auftrags wird von dem Arbeitsgruppenagenten an den Bauleiteragenten zurück gemeldet (siehe Abb. 3). Dieser protokolliert die fertiggestellten Aufträge für die Auswertung des Simulationslaufs. Nach der Beendigung eines Simulationslaufs werden die protokollierten Daten von dem Bauleiteragent in eine eigene SQL-Datenbank übertragen, in der die Ergebnisse der Simulationsläufe für die weitere Auswertung in Form von Terminplänen enthalten sind.

4 Fazit

Sowohl die Abbildung der Hierarchien wie auch die der Kooperationen auf einer Baustelle sind unter Verwendung eines agentenbasierten Simulationsmodells möglich. Die Selbstorganisation der Arbeitsaufträge durch die verschiedenen Arbeitsgruppen spiegelt die Eigendynamik einer Baustelle sehr gut wieder, die schnell zu Konfliktsituationen um Ressourcen, wie z.B. um Betriebsmittel, Material oder Räumlichkeiten, führen kann. Die vorgestellte CAD-integrierte Modellierungsumgebung CiSmo ermöglicht eine schnelle Entwicklung der Simulationsmodelle und eine einfache Parametrisierung, indem die benötigten Daten zum einen aus dem Gebäudemodell gewonnen werden und zum anderen ein wiederverwendbares Prozessmodell in einer SQL-Datenbank gespeichert wird.

Die zukünftige Arbeit wird sich auf die Validierung des Simulationsmodells anhand eines realen Rohbauprojektes konzentrieren. Außerdem wird die Erweiterung des

Systems für die Integration der komplexen Abhängigkeitsbeziehungen im Ausbau in den Fokus der Arbeit gestellt.

Besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung dieses Forschungsvorhabens.

Literatur

- BOENERT, L.; BLOEMEKE, M.: Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft, In: Bauingenieur, München, 78(2003)6, S. 277-283.
- CHAHROUR, Racha: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Kassel: kassel university press GmbH, 2006.
- KLÜGL, F.; OECHSLEIN, C.; PUPPE, F.; DORNHAUS, A.: Multi-Agent Modelling in Comparison to Standard Modelling. In: Tagungsband zur AIS'2002 (Artificial Intelligence, Simulation and Planning in High Autonomy Systems). Hrsg.: BARROS, F. J.; GIAMBIASI, N. Erlangen: SCS Publishing House, 2002, S. 105-110.
- KUGLER, Martin; FRANZ, Volkhard: Development of a Simulation System for the Preparation of Work in Building Construction. In: Computation in Civil Engineering – Tagungsband zur EG-ICE Conference 2009, TU Berlin. Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen. Aachen: Shaker Verlag, 2009, S. 186-193.
- WAGNER, G.; GIURCA, A.; PEHLA, M.; WERNER, J.: Modellierung und Simulation von Multiagenten-Systemen. In: Forum der Forschung, Wissenschaftsmagazin der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Cottbus, 12(2008)21, S. 47-52.
- WEBER, Jörg: Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten. Dortmund: Dissertation an der Universität Dortmund, Fakultät Maschinenbau, 2007.