

Discrete Rate Simulation als grundlegendes Paradigma bei der Entwicklung von mesoskopischen Flussmodellen

Discrete Rate Simulation as a Fundamental Paradigm for the Development of Mesoscopic Flow Models

Juri Tolujew, Tobias Reggelin
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF,
Magdeburg (Germany)
juri.tolujew@iff.fraunhofer.de

Alexander Kaiser
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,
Institut für Logistik und Materialflusstechnik (Germany)

Abstract: This paper demonstrates that the discrete rate simulation paradigm implemented in ExtendSim simulation software is a suitable basis for the development of mesoscopic simulation models of logistics flow processes. The development of reference models of transportation and inventory processes with the newly developed MesoSim simulation software is described.

1 Einleitung

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Nutzung der Discrete Rate Simulation (KRAHL 2009) als grundlegendes Paradigma bei der Entwicklung von mesoskopischen Flussmodellen und knüpft damit an den Beitrag der Autoren zur vorherigen ASIM-Fachtagung (TOLUJEW, REGGELIN 2008) an. In TOLUJEW und REGGELIN (2008) sowie in SCHENK, TOLUJEW und REGGELIN (2009) wurden die Grundideen einer mesoskopischen Vorgehensweise bei der Modellierung und Simulation von Prozessen in der Produktion und Logistik erläutert. Im Sinne der Modellierung besteht die Besonderheit dieser Vorgehensweise darin, dass der Modellentwickler bereits in der Phase der konzeptionellen Modellierung die Möglichkeit hat, mit aggregierten Daten zu Ressourcen bzw. zu bearbeitenden Objektmengen zu operieren. Da alle diesen Daten in der Regel einen dynamischen Charakter haben, werden sie in den Modellen in Form von Flüssen dargestellt, wobei diese Flüsse durch stückweise konstante Intensitätswerte gekennzeichnet werden. Da sich alle kumulativen Zustandsvariablen eines Modells unter dieser Bedingung nur linear verändern können, lassen sich die Zeitpunkte leicht berechnen,

zu denen diese Variablen bestimmte (kritische) Werte erreichen. Die Besonderheit dieser Art der Simulation besteht darin, dass Ereignisse für kontinuierliche Prozesse geplant werden können, was zu einer Erhöhung von Performance und Genauigkeit der Simulation führt.

Das Konzept der Discrete Rate Simulation entspricht dem Mechanismus der Ereignisplanung der mesoskopischen Simulation. Die Tatsache, dass die Discrete Rate Simulation in dem weltweit anerkannten Simulator ExtendSim gut beschrieben und programmtechnisch realisiert wurde, ist eine hilfreiche Unterstützung bei der weiteren Entwicklung der mesoskopischen Vorgehensweise, da das Prinzip der Ereignisplanung für kontinuierliche Prozesse nicht mehr in jeder Publikation neu erklärt werden muss. Somit kann eine Fokussierung auf die Probleme der konzeptionellen mesoskopischen Modellierung erfolgen, deren Lösung neue Perspektiven für die praxisorientierte Logistiksimulation erschließt.

In diesem Beitrag wird über Erfahrungen bei der Entwicklung mesoskopischer Referenzmodelle für typische Logistiksysteme (WENZEL 2000) unter Anwendung des neu entwickelten Simulators MesoSim berichtet. Die Referenzmodelle dienen dazu, den Modellentwickler in der Phase der konzeptionellen Modellierung und bei der Anwendung der mesoskopischen Vorgehensweise zu unterstützen.

2 Discrete Rate Simulation

Zur Discrete Rate Simulation (DAMIRON, NASTASI 2008; KRAHL 2009) gibt es im Vergleich zu den bereits seit längerer Zeit existierenden ereignisdiskreten und kontinuierlichen (in Form von System Dynamics nach Forrester) Ansätzen wenig Veröffentlichungen. In den Standardwerken zur Simulation wird die Discrete Rate Simulation gar nicht oder nur am Rande erwähnt. Deswegen soll hier auf die Grundlagen der Discrete Rate Simulation eingegangen werden.

Die Discrete Rate Simulation ist ein Simulationsansatz für die Simulation von linearen Flusssystemen und von hybriden Systemen, in denen die Flussprozesse durch lineare kontinuierliche Prozesse beschrieben werden können, was für eine Reihe von Flusssystemen zutrifft. Anwendungsgebiete der Discrete Rate Simulation sind Prozesse mit hoher Geschwindigkeit und hohem Durchsatz, wie z.B. Verpackungsprozesse und Abfüllprozesse und die Verarbeitung von Pulvern, Flüssigkeiten, Gasen, Schüttgut, wie z.B. in der Nahrungsmittelindustrie, pharmazeutischen Industrie, petrochemischen Industrie, Rohstoffindustrie und Wasseraufbereitung. In der Literatur beschriebene Anwendungen der Discrete Rate Simulation im Produktionsumfeld sind die Produktion von Flaschen mit den Schritten Formen, Blasformen, Dichtheitsprüfung und Palettierung (KRAHL 2009, S. 336 ff.), die Herstellung von Furnierplatten (KRAHL 2008, S. 220), eine Flaschenabfüllanlage (PHELPS u.a. 2002, S. 182 ff.) und die Produktion von Joghurt (IMAGINE THAT 2007, S. 274 ff.). Die Discrete Rate Simulation ist als drittes Simulationsparadigma neben ereignisdiskreter und kontinuierlicher Simulation in der Simulationssoftware ExtendSim (IMAGINE THAT 2007) implementiert.

Ereignisdiskrete Modelle und kontinuierliche Modelle haben bei der Abbildung dieser linearen kontinuierlichen Flussprozesse entscheidende Nachteile. Ereignisdiskrete Modelle sind mit einem sehr hohen Aufwand verbunden, wenn Flusssysteme

mit vielen Flussobjekten auf Objektebene abgebildet werden. Eine Aggregation in ereignisdiskreten Modellen führt zu Genauigkeitsverlusten und macht es schwieriger, Steuerungslogiken abzubilden. Kontinuierliche Modelle sind zu ungenau (STURROCK, DRAKE 1996, S. 432; FILMER u.a. 1994, S. 123 ff.).

Die Discrete Rate Simulation kombiniert deshalb Eigenschaften kontinuierlicher und ereignisdiskreter Simulationsmodelle. Discrete Rate Modelle arbeiten wie kontinuierliche Modelle mit Flussraten. Änderungen der Flussraten sind mit Ereignissen verbunden. Zwischen zwei Ereignissen bleiben die Flussraten konstant. Die resultierenden Bestandsgrößen sind demzufolge stückweise linear. Die Annahme stückweise konstanter Flussraten ist, wie der Name schon sagt, die Kernidee der Discrete Rate Simulation. Stückweise konstante Inputs und Outputs sind Voraussetzung für eine exakte ereignisdiskrete Darstellung kontinuierlicher Systeme (ZEIGLER u.a. 2000, S. 207).

Die Discrete Rate Simulation minimiert durch das ereignisbasierte Vorgehen im Vergleich zur kontinuierlichen Simulation die Anzahl der notwendigen Berechnungen, da nur bei Änderungen der Flussraten eine neue Berechnung durchgeführt wird. Es ist nicht mehr notwendig, den Systemzustand über eine zeitliche Diskretisierung mit hinreichend kleinen Zeitschritten und dem damit verbundenen schrittweisen Voranschreiten der Simulationszeit zu berechnen. Aufgrund der Linearität kann die zeitliche Entwicklung der Zustandsvariablen vorausberechnet werden und bei Erreichen vorher definierter Werte können Ereignisse geplant werden. Discrete Rate Modelle sind deshalb genauer als kontinuierliche Modelle. Gegenüber der ereignisdiskreten Simulation reduziert die Discrete Rate Simulation den Berechnungsaufwand, da keine einzelnen Objekte verfolgt werden.

Ein Ansatz, der der Discrete Rate Simulation ähnelt, wird durch (KOUIKOGLU, PHILLIS 2001) unter dem Namen Hybrid Simulation Models of Production Networks beschrieben.

3 Mesoskopische Modellkomponenten

Ein wichtiges Merkmal der mesoskopischen Modellierung und Simulation besteht darin, dass sich eine netzförmige Struktur, die das zu modellierende Materialflusssystem abbildet, gleichzeitig als ein konzeptionelles (prinzipielles) und als ein ausführbares (konkretes) Modell interpretieren lässt. Das ist vor allem deshalb möglich, weil zur Darstellung der Knoten einer Modellstruktur nur sechs verschiedene Modellkomponententypen (Bausteine) existieren (siehe Tabelle 1). Diese Modellkomponenten sind auch in der Bausteinpalette des Simulators MesoSim enthalten, der speziell zur Erstellung, Bearbeitung und Untersuchung von mesoskopischen Modellen für Produktions- und Logistiksysteme entwickelt wurde. Im Unterschied zu den herkömmlichen Simulationswerkzeugen für kontinuierliche Prozesse wird anstatt eines einfachen Behälters (Tank) ein mehrkanaliger Trichter als zentraler Modellbaustein angewendet (TOLUJEW, REGGELIN 2008; SCHENK, TOLUJEW, REGGELIN 2009). An den Kanten des Modells werden nicht nur kontinuierliche Discrete Rate Flüsse, sondern auch impulsförmige Flüsse in Form von Ereignissequenzen modelliert. Jeder einzelne Fluss wird durch seinen Produkttyp gekennzeichnet und kann als eine Sequenz dargestellt werden, die aus identifizierbaren Produktportionen besteht.

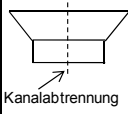
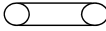




Bezeichnung	Symbol	Funktionen und Eigenschaften	Kenngrößen und Parameter
Trichter (Tr)		bildet Bearbeitungs- und/oder Lagerprozesse in einer Kapazitätseinheit ab verfügt über eine Grenzleistung μ , mit der begrenzte Bearbeitungsressourcen berücksichtigt werden Anzahl der Kanäle entspricht der Produkttypenzahl	Für jeden Kanal i : Aufzeichnung der Bestandsentwicklung B_i Steuerung des Ausgangsflusses λ_i^{out} über die Grenzleistung μ_i oder durch Impulsauslösung
Verzögerung (Ve)		bildet Transport- oder Lagerungsprozesse von bestimmter Dauer ab besitzt einen oder mehrere Kanäle, deren Anzahl der Produkttypenzahl entspricht	Ausgangsfluss λ_i^{out} entspricht dem um eine bestimmte Zeit τ verzögerten Eingangsfluss λ_i^{in}
Montage (Mo)		erzeugt einen neuen Produkttypen (Outputprodukt) durch Montage von Inputprodukten verfügt über eine Grenzleistung μ , mit der begrenzte Bearbeitungsressourcen berücksichtigt werden	Zusammensetzungsverhältnis (ZV) bestimmt, wie viele Mengeneinheiten der Inputprodukte für eine Mengeneinheit des Outputprodukts benötigt werden
Demontage (De)		erzeugt mindestens einen neuen Produkttypen (Outputprodukt) durch Demontage des Inputprodukts verfügt über eine Grenzleistung μ , mit der begrenzte Bearbeitungsressourcen berücksichtigt werden	Verteilungsverhältnis (VV) bestimmt, wie viele Mengeneinheiten je Outputprodukt aus einer Mengeneinheit des Inputprodukts entstehen
Quelle (Qu)		erzeugt Zuflüsse in das Modell besitzt einen oder mehrere Kanäle, deren Anzahl der Produkttypenzahl entspricht	Steuerung der Zuflusses λ_i^{out} mittels Intensität oder durch Impulsauslösung
Senke (Se)		bildet Abflüsse aus dem Modell besitzt einen oder mehrere Kanäle, deren Anzahl der Produkttypenzahl entspricht	Aufzeichnung der kumulierten Abflussmengen

Tabelle 1: Mesoskopische Modellbausteine

Die Annahme, Prozesse in Materialflusssystemen als Discrete Rate Prozesse abzubilden, scheint auf den ersten Blick eine sehr vereinfachte und grobe Abbildung zur Folge zu haben. In der Tat bietet diese Vorgehensweise eine große Freiheit bei der Auswahl des Detaillierungsgrades an, da die Länge der Zeitintervalle, in denen die Flussraten konstant sind, durch den Modellentwickler bestimmt werden kann. Der Modellentwickler kann in einem Modell Mittelwerte für Flüsse anwenden, die sich auf einzelne Stunden, Tage oder sogar Wochen beziehen. Bei Bedarf können auch

impulsförmige Flüsse modelliert werden, die eine sehr detaillierte Darstellung von einzelnen Produktmengen ermöglichen.

4 Referenzmodelle der mesoskopischen Simulation

Die grundlegenden Standardprozesse der Logistik – Transport, Lagerung und Kommissionierung – wurden als elementare, universelle Module abgebildet, die sich aus nur wenigen mesoskopischen Modellkomponenten zusammensetzen (siehe Tabelle 1). Diese Module bilden die Gruppe der prozessorientierten Referenzmodelle. Die zweite Gruppe besteht aus den so genannten strukturorientierten Referenzmodellen. Dazu zählen Transportnetze, die in elementare Strukturen (Linien-, Ring- und Sternstruktur), Transportketten und typische Netzstrukturen (Zuliefer-, Distributions- und Speditionsnetze) unterschieden werden. Auch zur Modellierung von Produktionsnetzwerken ist die mesoskopische Vorgehensweise gut geeignet und erlaubt außerdem eine übersichtliche Darstellung von Prozess- und Systemstrukturen (KAISER 2010). Im Folgenden werden zwei Beispiele für mesoskopische prozessorientierte Referenzmodelle beschrieben.

4.1 Referenzmodell Transport

Das Referenzmodell Transport kann als allgemeingültige Vorlage zur Abbildung von Transporten mit stetigen Fördermitteln, z.B. Bandförderanlagen, oder unstetig fördernden Fahrzeugen, z.B. außerbetrieblichen Verkehrsmitteln und innerbetrieblichen Transportmitteln, angewandt werden. Grundlage ist der Standardprozess Transport, der auf zwei Trichtern (Tr2 und Tr3) und einem mesoskopischen Verzögerungselement Ve1 basiert (Abbildung 1). Ein Transport erfolgt entweder stetig als Fluss mit einer bestimmten Intensität oder als Impuls in diskreten Zeitschritten, wobei die Impulsmenge z.B. der in einen LKW verladenen Menge entsprechen kann.

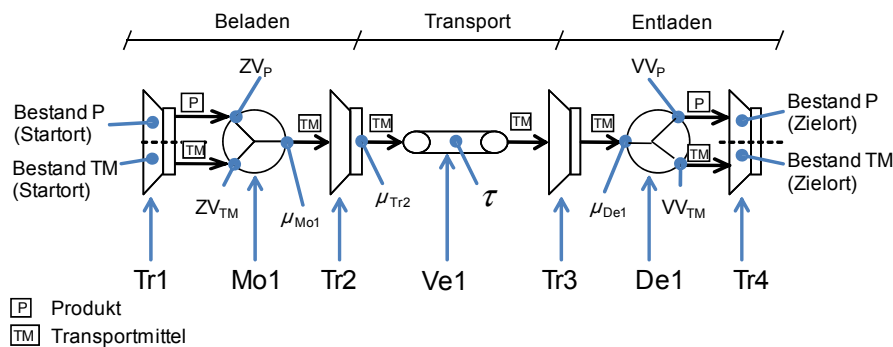


Abbildung 1: Referenzmodell Transport als mesoskopisches Bausteinmodell

In Abbildung 1 ist die Variante des Referenzmodells Transport mit unstetig fördernden Fahrzeugen abgebildet. Dabei werden Transportmittel und Transportgut als separate Flüsse am Eingang des Modells dargestellt. Beim Beladen werden Transportmittel- und Produktfluss in einem bestimmten Mengenverhältnis zusammengefügt, wozu ein Montageelement Mo1 verwendet wird. Das Zusammensetzungs-

verhältnis ZV_p beschreibt, wie viele Produktmengen als Zuladung in ein Transportmittel hinzugefügt werden. Der Output von Mo1 ist mit dem Input von Transportmitteln identisch, weshalb das Zusammensetzungsverhältnis ZV_{TM} immer Eins beträgt. Die Umschlagleistung beim Beladen wird durch die Grenzleistung der Montage μ_{Mo1} beschrieben. Die Transportmittel stauen sich im Warenausgang, wenn die aktuelle Transportleistung (Grenzleistung μ_{Tr2}) nicht ausreicht. Nach dem Transport wird eine Produktportion von TM, die im Trichter Tr3 wartet, in eine bestimmte Produktmenge VV_p und genau eine Transporteinheit von TM mithilfe des Demontageelements De1 umgewandelt.

4.2 Referenzmodell Lagerung

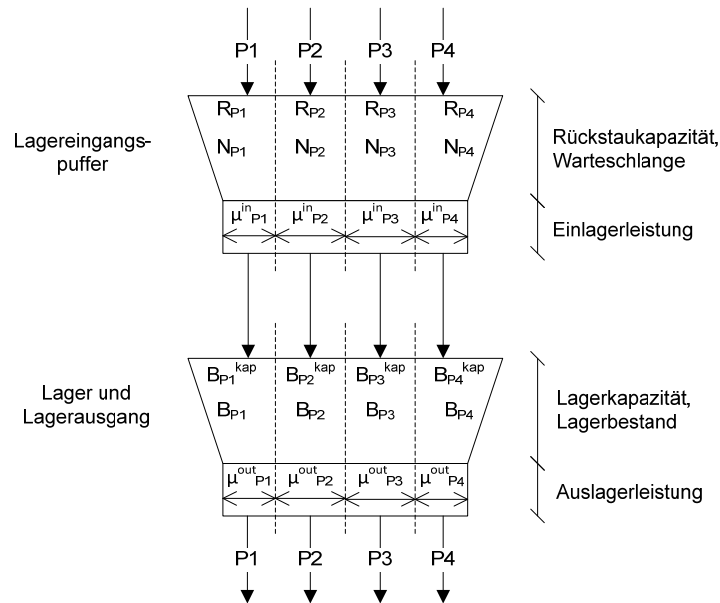


Abbildung 2: Referenzmodell Lagerung als mesoskopisches Bausteinmodell

Ein Lager wird allgemein mit zwei sequentiell angeordneten Trichtern dargestellt (Abbildung 2). Jedes Lager besitzt für jeden Produkttypen einen Kanal i . Im ersten Trichter befindet sich ein Eingangspuffer, der die einzelnen Warteschlangen N_i aufnimmt. Die Länge einer Warteschlange kann ggf. durch die Rückstaukapazität R_i begrenzt werden. Wenn die Länge der Warteschlange die Rückstaukapazität erreicht, wird der voranliegende Baustein blockiert, sodass dessen Ausgangsfluss unterbrochen werden muss. Die Einlagerung wird durch eine oder mehrere gleichartige Ressourcen durchgeführt. Dabei wird die verfügbare Ressourcenleistung auf die einzelnen Kanäle auf Basis einer beliebigen Strategie verteilt. Der zweite Trichter beinhaltet das Lager mit Lagerräumen und -stellplätzen. Die Kapazitäten B_i^{kap} und Bestände B_i werden abhängig vom Lagerbelegungstyp bestimmt. Der

Lagerausgang wird analog zum Lagereingang von Ressourcen bedient, die auf die einzelnen Kanäle verteilt werden.

Wenn die Ein- und Auslagerung durch dieselbe Ressource bzw. Ressourcengruppe durchgeführt wird, muss die verfügbare Leistung auf beide Trichter verteilt werden. Dabei ist die Bewegungsstrategie der Ressource von Bedeutung. Sie legt fest, in welcher Reihenfolge welche Ein-, Um- und Auslagerungen von den Lagerbetriebsmitteln durchgeführt werden, damit eine möglichst hohe Einlager-, Auslager- oder Durchsatzleistung erreicht wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Aus folgenden Gründen besteht Bedarf, weitere Schritte zur Verbreitung eines auf den Prinzipien der Discrete Rate Simulation basierenden mesoskopischen Modellierungs- und Simulationsparadigmas für Flusssysteme zu unternehmen:

1. Es werden oft sehr detaillierte und aufwendige ereignisdiskrete Modelle für Aufgabenstellungen entwickelt, deren Lösung auch mit weniger aufwendigen Modellen möglich wäre. Ereignisdiskrete Modelle werden in großen Mengen entwickelt, weil entsprechende Simulationswerkzeuge verbreitet sind. Ein weiterer Grund für die Verbreitung ereignisdiskreter Modelle in der Logistik ist ihre direkte und intuitive Anwendung für diskrete Flüsse von Stückgütern.
2. Kontinuierliche Modelle in Form von System Dynamics Modellen werden für logistische Aufgabenstellungen nur sehr selten entwickelt. Dazu gibt es sowohl objektive als auch subjektive Gründe. Zu den objektiven Gründen gehört z.B. die Tatsache, dass oft Schwierigkeiten entstehen, wenn Mehrproduktsysteme dargestellt werden sollen oder Steuerungsalgorithmen geändert werden sollen. Im Vordergrund stehen jedoch subjektive Gründe, da abstrakte kontinuierliche Modelle hauptsächlich nur von Modellentwicklern mit Neigung zu abstrakten mathematischen Analysemethoden genutzt werden.
3. Das Discrete Rate Prinzip ist den meisten Modellentwicklern auf dem Gebiet der Produktion und Logistik bis heute nicht bekannt. Auch in Situationen, wenn das Simulationswerkzeug Mittel zur Realisierung dieses Prinzips anbietet, wird diese Möglichkeit ignoriert, da das Discrete Rate Prinzip in der Regel nur für die Simulation von echten physikalischen Flüssen empfohlen wird.

Die mesoskopische Vorgehensweise ist vor allem dadurch gekennzeichnet, dass das für Entwicklung von Modellen erforderliche Abstraktionsniveau wesentlich niedriger als bei der Systems Dynamics Modellierung ist. Die Entwicklung des speziellen Simulators MesoSim wurde mit dem Ziel verfolgt, ein "logistikfreundliches" Werkzeug anzubieten. Die eingeführte "mesoskopische Notation" ist sowohl zur Darstellung von prinzipiellen als auch von konkreten Modellen geeignet.

Literatur

- DAMIRON, Cecile; NASTASI, Anthony: Discrete Rate Simulation Using Linear Programming. In: Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference.
Hrsg.: MASON, S. J.; HILL, R. R.; MÖNCH, L.; ROSE, O.; JEFFERSON, T.; FOWLER, J. W. Piscataway: IEEE, 2008, S. 740-749.

- FILMER, Peter J.; MARCONDES, Jorge A.; JOHNSTON, Robert E.: Simulation of High-Speed Packaging Lines. In: *Packaging Technology & Science*, Chichester, 7(1994)3, S. 123-130.
- IMAGINE THAT, Inc.: *ExtendSim User Guide*. San Jose, 2007.
- KAISER, Alexander: *Entwicklung von Referenzmodellen der mesoskopischen Simulation für Produktions- und Logistiksysteme*. Magdeburg: Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, 2010.
- KOUIKOGLU, Vassilis S.; PHILLIS, Yannis A.: *Hybrid Simulation Models of Production Networks*. New York: Kluwer Academic, Plenum Publishers, 2001.
- KRAHL, David: *ExtendSim 7*. In: *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*. Hrsg.: MASON, S. J.; HILL, R. R.; MÖNCH, L.; ROSE, O.; JEFFERSON, T.; FOWLER, J. W. Piscataway: IEEE, 2008, S. 215-221.
- KRAHL, David: *ExtendSim Advanced Technology: Discrete Rate Simulation*. In: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. Hrsg.: ROSSETTI, M. D.; HILL, R. R.; JOHANSSON, B.; DUNKIN, A.; Ingalis, R. G. Piscataway: IEEE, 2009, S. 333-338.
- PHELPS, Richard A.; PARSONS, David J.; SIPRELLE, Andrew J.: *Non-Item Based Discrete-Event Simulation Tools*. In: *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. Hrsg.: YÜCESAN, E.; CHEN, C.-H.; SNOWDON, J. L.; CHARNES, J. M. Piscataway: IEEE, 2002, S. 182-186.
- SCHENK, Michael; TOLUJEW, Juri; REGGELIN, Tobias: *Mesoscopic Modeling and Simulation of Logistics Networks*. In: *Preprints of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. Hrsg.: Bakhtadze, N.; Dolgui, A. Moskau: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russia, 2009, S. 586-591.
- STURROCK, David T.; DRAKE, Glenn R.: *Simulation for High Speed Processing*. In: *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*. Hrsg.: CHARNES, J. M.; MORRICE, D. J.; BRUNNER, D. T.; SWAIN, J. J. Washington, DC: IEEE, 1996, S. 432-436.
- TOLUJEW, Juri; REGGELIN, Tobias: *Mesoskopische Simulation: Zwischen der kontinuierlichen und ereignisdiskreten Simulation*. In: *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Hrsg.: RABE, M. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag, S. 585-594.
- WENZEL, Sigrid (Hrsg.): *Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik*. Ghent: Society for Computer Simulation International, 2000.
- ZEIGLER, Bernard P.; PRAEHOFER, Herbert; KIM, Tag Gon: *Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. San Diego: Academic Press, 2000.