

# Mesoskopische Simulationsmodelle in der Produktions- und Logistikplanung

## *Mesoscopic Simulation Models for Production and Logistics Planning*

Tobias Reggelin, Sebastian Lang, David Weigert, Otto-von-Guericke-Universität  
Magdeburg, Magdeburg (Germany), tobias.reggelin@ovgu.de,  
sebastian.lang@ovgu.de, david.weigert@ovgu.de

Christian Schauf, Volkswagen AG, Wolfsburg (Germany),  
christian.schauf@volkswagen.de

**Abstract:** This paper describes and evaluates the application of mesoscopic discrete-rate based simulation models for typical production and logistics planning tasks in the automotive industry. In terms of level of detail, mesoscopic simulation models fall between object based discrete-event simulation models and flow based continuous simulation models. Mesoscopic models represent logistics flow processes on an aggregated level through piecewise constant flow rates by applying the discrete-rate simulation paradigm instead of modelling individual flow objects. This leads to a fast model creation and computation.

## 1 Einleitung

Ereignisdiskrete Simulationsmodelle sind die in der Ablaufsimulation in Produktion und Logistik am häufigsten genutzten Simulationsmodelle und Stand der Technik in der Produktions- und Logistikplanung in der Automobilindustrie (vgl. Huber und Wenzel 2011). Das Paradigma der ereignisdiskreten Simulation wird gern genutzt, da ein Großteil der logistischen Prozesse ebenfalls diskreter Natur sind (Scholz-Reiter et al. 2007). Der Begriff diskrete ereignisorientierte Simulation in der Logistik basiert auf dem Konzept von Objekten, Ressourcen und Flussdiagrammen, die den Objektfluss und die Ressourcennutzung beschreiben (Borshchev und Filippov 2004). Aufgrund der Möglichkeit, einzelne logistische Objekte abzubilden, können ereignisdiskrete Simulationsmodelle logistische Systeme in beliebiger Detailliertheit darstellen und werden oft als mikroskopische Modelle umgesetzt (Borshchev und Filippov 2004; Pierreval et al. 2007).

In der deutschen Automobilindustrie ist Plant Simulation das Standardwerkzeug für ereignisdiskrete Simulationsmodelle. Eine Umfrage in der Automobilindustrie mit 29 teilnehmenden Produktionsplanern (Schauf 2016) zeigt, dass 96,6 % der Produktionsplaner die Nutzung von Simulationsmodellen in der Planung entweder für

‚unbedingt notwendig‘, ‚sehr wichtig‘ oder ‚wichtig‘ halten. Nur 3,4 % der Produktionsplaner halten die Simulation für ‚weniger wichtig‘. Die wesentlichen Anforderungen der Produktionsplaner an ein Simulationsmodell sind nach Schauf (2016) in der folgenden Reihenfolge:

1. eine hohe Ergebnisqualität,
2. eine schnelle Ergebnisbereitstellung,
3. Transparenz,
4. eine einfache Konfiguration und
5. die Bedienbarkeit durch den Fachplaner.

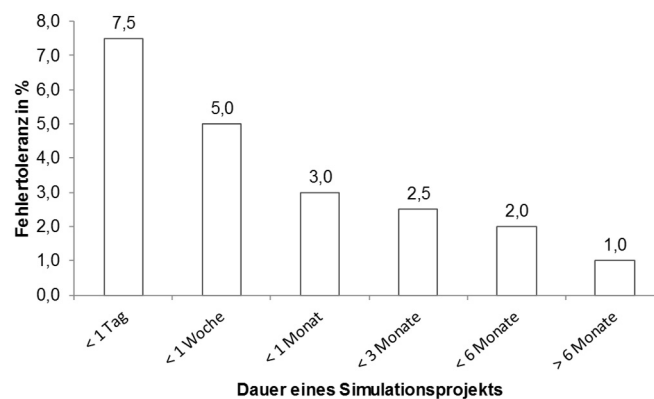
Wirft man einen Blick auf die Realität des Simulationseinsatzes in der Produktionsplanung in der Automobilindustrie, so lässt sich feststellen, dass Simulationsstudien oft eine lange Dauer haben. Mehr als 60 % der Simulationsstudien dauern länger als einen Monat und 30 % der Simulationsstudien sogar länger als sechs Monate (Schauf 2016). Das widerspricht dem Wunsch der Produktionsplaner nach einer schnellen Ergebnisbereitstellung.

Ein Grund für die hohen Zeitdauern von Simulationsstudien kann die Verwendung ereignisdiskreter Simulationsmodelle sein, da größere ereignisdiskrete Modelle mit vielen Flussobjekten oder Modelle, deren Detaillierungsgrad zu hoch gewählt ist, mit einem hohen Aufwand für die Modellerstellung und -berechnung verbunden sein können (vgl. Kuhn und Rabe 1998, S. 3; Law und Kelton 2007, S. 2; Feldmann und Reinhart 2000, S. 22; Scholz-Reiter et al. 2008, S. 118; Kosturiak und Gregor 1995, S. 65ff.; Huber und Dangelmaier 2009).

Ein möglicher Lösungsansatz, um die hohen Zeitdauern einer Simulationsstudie zu verkürzen, kann demnach darin liegen, mit weniger detaillierten Simulationsmodellen zu arbeiten. Ein möglicher Ansatz, Planungsaufgaben in Produktion und Logistik mit mesoskopischen Simulationsmodellen zu unterstützen wird von Schenk et al. (2009), Reggelin (2011), Reggelin und Tolujew (2011) und Hennies et al. (2014) beschrieben. Die beschriebenen mesoskopischen Simulationsmodelle basieren im Wesentlichen auf der discrete-rate Simulation (Krahl 2009; Damiron und Nastasi 2008).

Der geringere Detaillierungsgrad in mesoskopischen Modellen kann zu ungenaueren Simulationsmodellen führen. In der Befragung von Schauf (2016) wurden die Produktionsplaner nach der zulässigen Fehlertoleranz einer Simulationsstudie befragt (Abb. 1). Die Fehlertoleranz sinkt mit Dauer der Simulationsstudie. Bei kurzen Simulationsstudien, die weniger als einen Tag bzw. weniger als eine Woche benötigen, akzeptieren Produktionsplaner eine Fehlertoleranz von 7,5 % bzw. 5 %. Bei Simulationsstudien mit bis zu sechs Monaten Dauer werden noch 2 % Fehler akzeptiert. Das kann bedeuten, dass Produktionsplaner durchaus bereit wären, mit Modellen zu arbeiten, die nicht so detailliert sind, dafür aber weniger Zeit für Modellerstellung und -berechnung benötigen.

Ereignisdiskrete Simulationsmodelle mit der Simulationssoftware Plant Simulation lassen jedoch nur bis zu einem gewissen Grad Vereinfachungen und Abstraktionen zu, da Plant Simulation auf die Erstellung ereignisdiskreter Modelle spezialisiert ist. Simulationswerkzeuge wie ExtendSim (Damiron und Krahl 2014) und AnyLogic (Jain und Lechevalier 2016) hingegen ermöglichen die Erstellung von Simulationsmodellen mit verschiedenen Simulationsparadigmen in einem Modell, wie zum Beispiel die Kombination von discrete-event und discrete-rate Modellelementen in ExtendSim.



**Abbildung 1:** Fehlertoleranz der befragten Produktionsplaner hinsichtlich von Simulationsergebnissen (Schauf 2016)

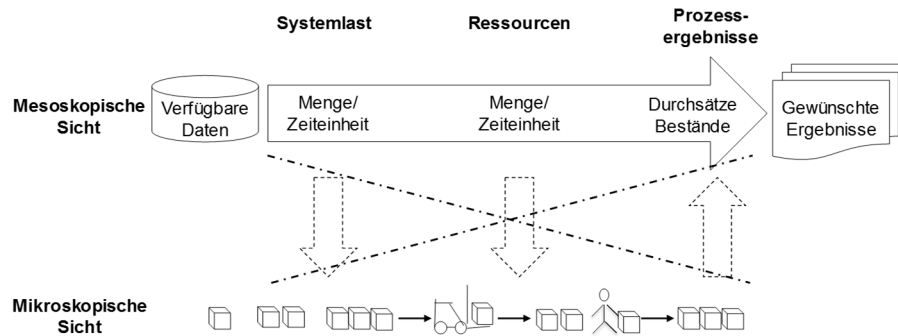
ExtendSim und AnyLogic sind jedoch in der Automobilindustrie bei weitem nicht so verbreitet wie Plant Simulation, was unter anderem daran liegt, dass Plant Simulation mit seinen Bausteinen den Fokus auf Materialflussprozesse legt und das mit dem in Plant Simulation erstellten VDA Automotive Bausteinkasten (Mayer und Pöge 2010) spezielle Bausteine für Produktions- und Logistikprozesse in der Automobilindustrie existieren und genutzt werden können.

Der Beitrag untersucht an zwei Planungsaufgaben aus der Automobilindustrie, ob die Anwendung des mesoskopischen Simulationsansatzes den Anforderungen der Produktionsplaner nach kürzeren Simulationsstudien gerecht werden kann.

## 2 Mesoskopische Simulationsmodelle

Bei vielen Aufgabenstellungen in Produktion und Logistik (z. B. Dimensionierungen, Kapazitätsplanungen, Durchsatzberechnungen, Grobplanungen) ist eine aggregierte mesoskopische Sicht vorhanden, jedoch wird der Begriff mesoskopisch nicht ausdrücklich genutzt. Oft sind sowohl die Daten zu den Leistungsanforderungen (Systemlast) und den Ressourcen (System) sowie die gewünschten Leistungsergebnisse in einer aggregierten Form (Menge/Zeiteinheit) gegeben, die einer mesoskopischen Sicht entspricht (siehe Abb. 2).

Die Grundidee mesoskopischer Simulationsmodelle besteht deshalb in der Abbildung logistischer Flussprozesse auf einer aggregierten Ebene, um eine schnelle Modell-erstellung und -berechnung zu ermöglichen. Deshalb operieren mesoskopische Modelle mit Flussobjektmenge und nicht mit einzelnen Flussobjekten. Logistikprozesse können somit durch Flüsse mit stückweise konstanten Flussintensitäten (discrete-rate Simulation) abgebildet werden. Das ermöglicht eine Ereignisplanung für lineare kontinuierliche Flussprozesse und führt zu einer schnellen Modellberechnung, da der Systemzustand nicht mehr kontinuierlich neu berechnet werden muss, sondern nur noch dann, wenn Änderungen der Flussintensitäten auftreten.



**Abbildung 2:** Mesoskopische und mikroskopische Sicht

Der Simulationszeitschritt ist somit variabel und die Schrittgröße hängt vom Auftreten geplanter Ereignisse ab. Das führt zu kurzen Rechenzeiten. Die Prinzipien der ereignisbasierten Berechnung von linearen kontinuierlichen Prozessen werden in der discrete-rate Simulation der Software ExtendSim (Krahl 2009; Damiron und Nastasi 2008) und im hybriden Simulationsansatz von Kouikoglou und Phillis (2001) angewendet.

Eine reine ereignisdiskrete Darstellung kontinuierlicher Systeme wie die discrete-rate Simulation ist jedoch aufgrund ihrer hohen Abstraktion und Aggregation nicht sehr gut für die direkte Anwendung in der Logistik geeignet. Der von Reggelin (2011) und Reggelin und Tolujew (2011) beschriebene mesoskopische Modellierungs- und Simulationsansatz erweitert deshalb die reine ereignisbasierte Berechnung kontinuierlicher Systeme um ein

- Produktmodell mit Produkttypen (für die Abbildung verschiedener logistischer Flussobjekte) und Produktportionen (für die Abbildung von Aufträgen, Losen oder zusammenhängenden Lieferungen) und
- ein Prozessmodell mit sowohl stückweise konstanten Flussraten als auch impulsförmigen Flüssen für die Abbildung von gebündelten Objektflüssen.

### 3 Einsatz von Simulationsmodellen in der Produktions- und Logistikplanung

Schauf (2016) hat 29 Produktionsplaner befragt, welche Aufgaben (angelehnt an VDI 3633 Blatt 1 2014) sie bereits jetzt mit Hilfe von Simulation lösen und für welche Aufgaben sie zukünftig Simulationsmodelle anwenden möchten. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse dieser Befragung und die Eignung mesoskopischer Simulationsmodelle für diese Aufgabenstellungen aus Sicht der Autoren. Mesoskopische Simulationsmodelle scheinen für die meisten Planungsaufgaben, für die bereits Simulationsmodelle genutzt werden, geeignet zu sein.

**Tabelle 1:** Einsatz von Simulation in der Produktions- und Logistikplanung (Schauf 2016)

	Simulation bereits genutzt	Geplanter Einsatz von Simulation	Mesoskopische Simulation geeignet
Auftragsreihenfolge	8 %	14 %	Nein
Durchsatz	15 %	11 %	Ja
Strategien	11 %	18 %	Ja
Funktions- und Leistungsnachweis	11 %	18 %	Teilweise
Dimensionierung	30 %	18 %	Teilweise
Leistungsgrenzen	2 %	4 %	Ja
Engpässe	5 %	4 %	Teilweise
Analyse von Alternativen	9 %	7 %	Teilweise

Die aktuelle und die geplante Nutzung von Simulation für Analyse- und Planungsaufgaben, die in Summe für die meisten Aufgaben zwischen 6 % und 48 % liegt (Tab. 1), steht im Widerspruch zu der Aussage, dass 97 % der Produktionsplaner eine Nutzung von Simulationsmodellen in der Planung als ‚unbedingt notwendig‘ (17 %), ‚sehr wichtig‘ (45 %), oder ‚wichtig‘ (35 %) erachten (Schauf 2016). Ein Grund dafür kann die bereits erwähnte Diskrepanz zwischen der von den Produktionsplanern geforderten schnellen Bereitstellung von Simulationsergebnissen und der oft langen Dauer von Simulationsprojekten sein.

## 4 Anwendung mesoskopischer Simulationsmodelle

Anhand von zwei Beispielen aus dem Bereich der Automobilindustrie wird nachfolgend gezeigt, wie die Anwendung von mesoskopischen discrete-rate Simulationsmodellen zur schnellen Bereitstellung von Simulationsergebnissen beitragen kann:

- Bewertung der Leistungsfähigkeit des Wareneingangs eines Montagewerkes.
- Ermittlung der Anzahl der benötigten Lastaufnahmemittel in einer Montagelinie.

Es werden Ergebnisgenauigkeit und Simulationsaufwand im Vergleich zu ereignisdiskreten Simulationsmodellen mit Plant Simulation verglichen, die typischerweise für diese Aufgabenstellungen angewendet werden. Für die Umsetzung der mesoskopischen Modelle wurde die Simulationssoftware ExtendSim genutzt, da ExtendSim die Möglichkeit bietet die discrete-rate Simulation (Rate Library) mit der ereignisdiskreten flussobjektbasierten Simulation (Item Library) in einem Modell zu kombinieren.

### 4.1 Bewertung der Leistungsfähigkeit des Wareneingangs eines Montagewerkes

In diesem Beispiel wird untersucht, ob der Durchsatz des Warenvereinnahmungsprozesses eines Montagewerkes die erforderliche Leistung erbringt. Abbildung 3 illustriert den wesentlichen Prozessablauf. Zwischen 06:00 Uhr und 23:30 Uhr

erreichen im halbstündlichen Takt ein bis drei LKW den Wareneingang. Die LKW werden zu einer der drei Schleusen zugewiesen. Die Anzahl geladener Behälter pro LKW unterliegt einer stochastischen Schwankung, deren Parameter vom Produkttyp der geladenen Ware abhängen. Jeder LKW hat mindestens einen Behälter und maximal 90 Behälter geladen. Nach der Entladung und einer Qualitätsüberprüfung werden die Behälter von Gabelstaplern in sogenannten Sortiergassen konsolidiert. Der abschließende Einlagerungsprozess wird erst initiiert, sobald alle Behälter einer LKW-Ladung auf die Sortiergassen verteilt wurden.

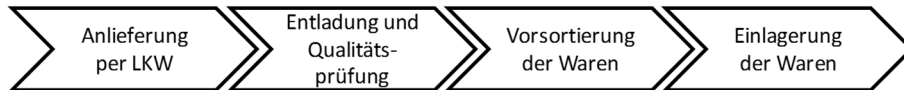


Abbildung 3: Prozesse am Wareneingang des Montagewerkes

Eine Herausforderung bei der mesoskopischen Modellierung ist die Wahl der geeigneten Aggregation. Es muss entschieden werden, welche Prozesse zu Flussraten aggregiert werden können und welche Prozesse weiterhin auf Objektebene abgebildet werden müssen. Abbildung 4 zeigt das konzeptionelle mesoskopische Modell in der Notation von ExtendSim. Es werden sowohl discrete-rate Modellierungselemente aus der Rate Library als auch discrete-event Modellierungselemente aus der Item Library genutzt.

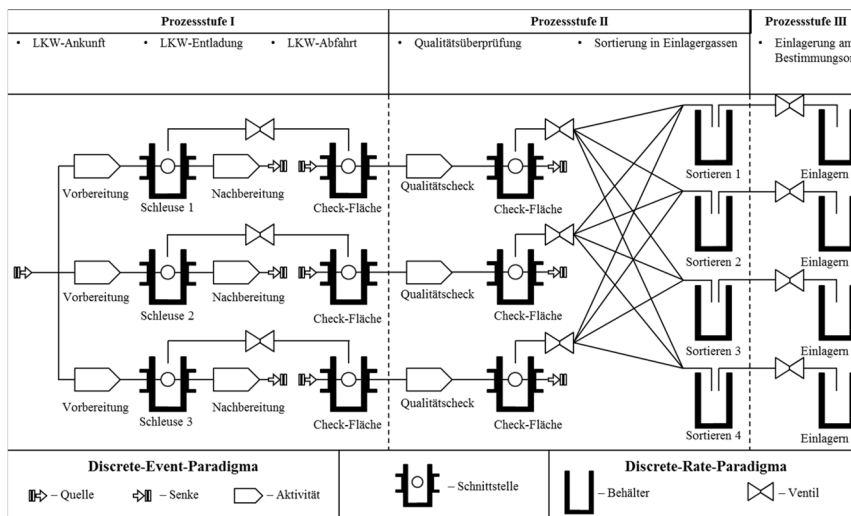


Abbildung 4: Konzeptionelles mesoskopisches Modell mit discrete-rate und discrete-event Prozessen in der Notation von ExtendSim

Die erstellten Flussobjekte in Prozessstufe I repräsentieren ankommende LKW im Wareneingangsbereich, deren Anzahl geladener Behälter über ein Attribut gespeichert ist. Nachdem ein LKW-Flussobjekt einen der drei parallelen Vorbereitungsprozesse durchlaufen hat, gelangt es in die zugehörige Schleuse, wo der Entladungsprozess

stattfindet. Im Schleusenelement wird das Attribut des LKW ausgelesen und in einen discrete-rate Bestand transformiert. Die Entladungsarbeitsspiele der Gabelstapler werden zu einer Flussrate aggregiert, welche die Prozesszeit aller notwendigen Arbeitsspiele für die Entladung eines LKW in Abhängigkeit

- der zum Zeitpunkt für den Prozess reservierten Anzahl an Gabelstaplern,
- der Fahrgeschwindigkeit, der Ladekapazität, der Aufnahme- und Abgabezeit und der Umstapelzeit pro Behälter von Gabelstaplern,
- der Distanz zwischen Schleuse und Pufferfläche und
- der im LKW geladenen Behälteranzahl

berücksichtigt.

Entladene LKW durchlaufen einen Nachbereitungsprozess, bevor sie das System verlassen und die jeweilige Schleuse für nachfolgende LKW freigeben. Die Qualitätsüberprüfung in Prozessstufe II erfolgt wieder objektbasiert, indem eine Entität erstellt wird, welche den discrete-rate Bestand der Pufferfläche als Attribut speichert. Der Prozess wird auf diese Weise realitätsnah abgebildet, da im Originalsystem die Behälter einer LKW-Ladung erst für die Vorsortierung freigegeben werden, wenn alle Behälter die Qualitätsüberprüfung durchlaufen haben. Des Weiteren ist eine aggregierte objektbasierte Modellierung hier sinnvoll, da so die Qualitätsüberprüfung aller Behälter in einem Berechnungsschritt durchgeführt werden kann.

Die Berechnungszeit für einen Simulationslauf mit dem mesoskopischen Modell ist wesentlich geringer als im ereignisdiskreten Modell (Tab. 2). Hinsichtlich der Warteschlangenlängen vor den Schleusen sowie des täglichen Systemdurchsatzes von Behältern sind nur sehr geringe Ergebnisabweichungen zwischen dem mesoskopischen und dem mikroskopischen Modell festzustellen.

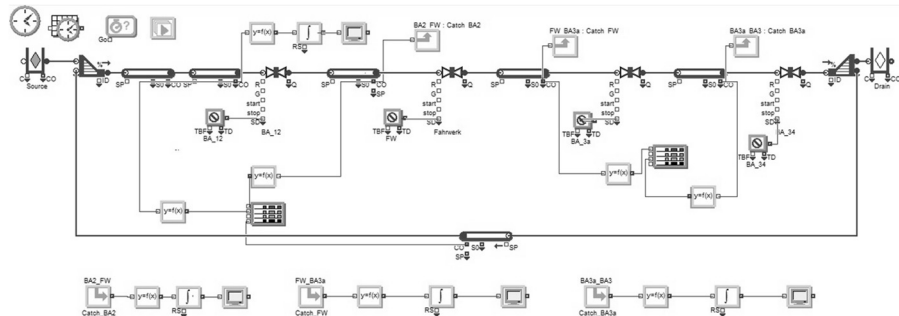
**Table 2:** Vergleich der Simulationsergebnisse des mikroskopischen und des mesoskopischen Modells

	Durchsatz (Behälter/Tag)	Max. Anzahl LKW am Wareneingang	Dauer für einen Simulationslauf (Sekunden)
Mikroskopisches discrete-event Modell mit VDA Baustein-kasten in Plant Simulation	3.445	3	201
Mesoskopisches hybrides discrete-rate und discrete-event Model mit ExtendSim	3.464	3	27

#### 4.2 Ermittlung der Anzahl der benötigten Lastaufnahmemittel in einer Montagelinie

Eine typische Aufgabe für Produktions- und Logistikplaner ist die Dimensionierung der notwendigen Ressourcen für einen Prozess. Ca. 30 % der Planer nutzen für diese Aufgabe Simulationsmodelle (Tab. 1). In folgendem Beispiel hat der Planer die Aufgabe die benötigte Anzahl von Lastaufnahmemitteln für fünf Abschnitte einer

Montagelinie zu bestimmen. Abbildung 5 zeigt das dafür erstellte mesoskopische discrete-rate basierte Simulationsmodell in ExtendSim. Das Modell besteht im Wesentlichen aus den Blöcken der Rate Library und den Blöcken der Value Library. Das mesoskopische Modell wurde mit einem Plant Simulation Modell mit dem VDA Bausteinkasten für die gleiche Aufgabenstellung verglichen (Tab. 3).



**Abbildung 5:** Mesoskopisches discrete-rate Simulationsmodell mit ExtendSim zur Ermittlung der benötigten Lastaufnahmemittel für eine Montagelinie

**Tabelle 3:** Vergleich der Simulationsergebnisse des mikroskopischen und des mesoskopischen Modells

	Anzahl benötigter Lastaufnahme- mittel	Abweichung der Dauer für einen Simulations- ergebnisse	Simulationslauf (Minuten)
Mikroskopisches discrete-event Modell mit VDA Bausteinkasten in Plant Simulation	417	0 %	720
Mesoskopisches discrete-rate Modell mit ExtendSim	421	1 %	1

Die Ungenauigkeit des mesoskopischen discrete-rate Modells im Vergleich zum ereignisdiskreten Modell liegt bei ca. 1 %. Diese Abweichung liegt innerhalb der von den befragten Produktionsplanern akzeptierten Fehlertoleranz (Abb. 1). Die Nutzung der flussratenbasierten Simulation im mesoskopischen Modell führt zu einer sehr starken Reduzierung der Simulationsdauer (Tab. 3). Der Modellierungsaufwand für das mesoskopische discrete-rate Modell ist aufgrund der aggregierten flussratenbasierten Modellierung ebenfalls geringer als der für das ereignisdiskrete Modell. Das zeigt, dass mesoskopische, auf der discrete-rate Simulation basierende Modelle für den Produktions- und Logistikplaner eine mögliche Alternative zu ereignisdiskreten Modellen sind, um schnelle Simulationsergebnisse mit ausreichender Ergebnisqualität zu erhalten.



## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendung mesoskopischer discrete-rate Simulationsmodelle für zwei typische Planungsaufgaben aus der Automobilindustrie hat das Potenzial dieser Modellklasse gezeigt, den Anforderungen von Produktions- und Logistikplanern nach einer schnellen Bereitstellung der Simulationsergebnisse bei trotzdem ausreichender Genauigkeit der Ergebnisse gerecht zu werden.

Mesoskopische discrete-rate Modelle können für Analyse- und Planungsaufgaben Anwendung finden, in denen es nicht um die Verfolgung einzelner Flussobjekte geht, sondern in denen die Aggregation logistischer Flussobjekte zu Flussraten möglich ist. Denn nur so lässt sich die Berechnungszeit für die Simulationsmodelle reduzieren. Das schließt Aufgaben, wie beispielsweise die Untersuchung der Reihenfolgegüter in der Endmontage, aus. Für eine Reihe anderer Aufgaben, wie beispielsweise Durchsatzbetrachtungen, können mesoskopische discrete-rate Modelle jedoch eine zeitsparende Alternative zu discrete-event Modellen darstellen. Aufgabe für die Zukunft ist es, die Anwendung mesoskopischer discrete-rate Simulationsmodelle weiter voranzutreiben, um ihre Vor- und Nachteile und mögliche Einsatzfelder noch besser zu analysieren und zu beschreiben.

## Literatur

- Borshchev, A.; Filippov, A.: From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. In: Kennedy, M.; Winch, G.W.; Langer, R.S.; Rowe, J.I.; Yanni, J.M. (Hrsg.): Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society, Oxford (England), 2004.
- Damiron, C.; Krahl, D.: A Global Approach for Discrete Rate Simulation. In: Tolk, A.; Diallo, S.Y.; Ryzhov, I.O.; Yilmaz, L.; Buckley, S.; Miller, J.A. (Hrsg.): Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference (WSC), Savannah (USA), 2014, S. 2966-2977.
- Damiron, C.; Nastasi, A.: Discrete Rate Simulation Using Linear Programming. In: Mason, S.J.; Hill, R.R.; Moench, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; Fowler, J.W. (Hrsg.): Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (WSC), Miami (USA), 2008, S. 740-749.
- Feldmann, K.; Reinhart, G.: Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer 2000.
- Hennies, T.; Reggelin, T.; Tolujew, J.; Piccut, P.-A.: Mesoscopic Supply Chain Simulation. *Journal of computational science* 5 (2014) 3, S. 463-470.
- Huber, D.; Dangelmaier, W.: Controlled Simplification of Material Flow Simulation Models. In: Rossetti, M.D.; Hill, R.R.; Johansson, B.; Dunkin, A.; Ingalls, R.G. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), Austin (USA), 2009, S. 839-850.
- Huber, L.; Wenzel, S.: Trends und Handlungsbedarfe der Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. *Industrie Management* 27 (2011) 5, S. 27-30.
- Jain, S.; Lechevalier, D.: Standards based Generation of a Virtual Factory Model. In: Roeder, T.M.K.; Frazier, P.I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Huschka, T.; Chick, S.E. (Hrsg.): Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference (WSC), Washington, D.C. (USA), 2016, S. 2762-2773.

- Kosturiak, J.; Gregor, M.: Simulation von Produktionssystemen. Wien: Springer 1995.
- Krahl, D.: ExtendSim Advanced Technology: Discrete Rate Simulation. In: Rossetti, M.D.; Hill, R.R.; Johansson, B.; Dunkin, A.; Ingalls, R.G. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), Austin (USA), 2009, S. 333-338.
- Kuhn, A.; Rabe, M.: Simulation in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 1998.
- Kouikoglou, V.S.; Phillis, Y.A.: Hybrid simulation models of production networks. New York: Kluwer Academic Plenum Publishers 2001.
- Law, A.M.; Kelton, W.D.: Simulation Modeling and Analysis, 4. Auflage. Boston: McGraw-Hill, Inc. 2007.
- Mayer, G.; Pöge, C.: Auf dem Weg zum Standard – Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 29-36.
- Pierreval, H.; Bruniaux, R.; Caux, C.: A Continuous Simulation Approach for Supply Chains in the Automotive Industry. In: Simulation Modelling Practice and Theory 15 (2007) 2, S. 185-198.
- Reggelin, T.: Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation, 2011.
- Reggelin, T.; Tolujew, J.: A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation of Logistics Processes. In: Jain, S.; Creasey, R. R.; Himmelspach, J.; White, K. P.; Fu, M. (Hrsg.) Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC), Phoenix (USA), 2011, S. 1513-1523.
- Schauf, C.: Anforderungen von Produktionsplanern an die Simulation – Discrete-Rate Simulation als Ergänzung zur ereignisdiskreten Simulation in der Produktionsplanung? In: Schenk, M. (Hrsg.): 21. Magdeburger Logistiktage: Logistik neu denken und gestalten, Magdeburg (Deutschland), 2016, S. 141-148.
- Schenk, M.; Tolujew, J.; Reggelin, T.: Mesoscopic modeling and simulation of logistics networks. IFAC Proceedings Volumes 42 (2009) 4, S. 582-587.
- Scholz-Reiter, B.; Wirth, F.; Freitag, M.; Dashkovskiy, S.; Jagalski, J.; de Beer, C.; Ruffer, B.: Mathematical Models of Autonomous Logistic Processes. In: Hülsmann, M.; Windt, K. (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics – The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow. Berlin: Springer 2007, S. 121-138.
- Scholz-Reiter, B.; de Beer, C.; Freitag, M.; Hamann, T.; Rekersbrink, H.; Tervo, J.T.: Dynamik logistischer Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin: Springer 2008, S. 109-138.
- VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Berlin: Beuth 2014.