

Prozess-Simulation in kleinen und mittleren Unternehmen mittels des Baukastensystems *KMUSimMetall*

Process Simulation in Small and Medium-sized Enterprises with the Modular System KMUSimMetall

Steffi Rudel, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Germany),
steffi.rudel@unibw.de

Abstract: In large companies process simulation is often used in production and logistics to improve the achievement of time or cost schedules. However, in small and medium-sized enterprises (SME) in Germany, process simulation is used quite seldom. One reason is the lack of tools which support SME in using process simulation by meeting their requirements. Therefore, the modular system *KMUSimMetall* was developed. In this article, the modular system *KMUSimMetall* is introduced and examples for the usage in the daily business of SME are shown.

1 Einführung

Prozess-Simulation ist wissenschaftlich für den Bereich Produktion und Logistik seit Jahrzehnten untersucht und etabliert (z. B. Spieckermann 2005, S. 3; Rabe et al. 2008, S. 1; Wenzel et al. 2008, S. 1). Ihr Einsatz kann Unternehmen dabei unterstützen, ihre logistischen Zielgrößen zu verbessern. Die logistischen Zielgrößen benennen Nyhuis und Wiendahl (2012, S. 11) für Produktionsprozesse mit Termintreue, Durchlaufzeit, Leistung, Bestand und Kosten.

Um Unternehmen beim Einsatz der Prozess-Simulation zu unterstützen, wurden in der Vergangenheit verschiedene Instrumente entwickelt (Rabe und Hellingrath 2001, S. 117-190; Wenzel et al. 2008, S. 1). Jedoch war der Einsatz der Prozess-Simulation in der unternehmerischen Praxis in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) in Deutschland trotz der entwickelten Instrumente bis in die frühen 2000er Jahren nicht die Regel (Bös 2008, S. 409; Spieckermann 2008, S. 83). Studien zeigen den Trend, dass sich daran auch in der neueren Zeit wenig geändert hat (agiplan GmbH 2015, S. 94). Gerade im Zusammenhang mit den Entwicklungen im Bereich Industrie 4.0 gewinnt dieses Thema zusätzlich an Bedeutung, da die Simulation von Prozessen eines der Kernelemente der Digitalen Fabrik darstellt.

In der einschlägigen Fachliteratur werden mögliche Ursachen für den defizitären Einsatz der Prozess-Simulation in KMU besprochen (Bierschenk et al. 2005; Bös

2008; Dettmering et al. 2010). Dort sind Hinweise zu finden, dass die bisher entwickelten Instrumente KMU beim Einsatz der Prozess-Simulation nicht genügend unterstützen.

Es ergibt sich also die Problematik, dass ein Instrument fehlt, das die speziellen Erfordernisse von KMU aufgreift und die KMU beim Einsatz der Prozess-Simulation unterstützt. Diese Lücke soll durch die Entwicklung und Bereitstellung eines passenden Instrumentes geschlossen werden. Besonderes Augenmerk wird auf die Praxistauglichkeit des Instrumentes gelegt, weshalb eine Zusammenarbeit mit ausgewählten KMU initiiert wurde. Als Wirtschaftszweig wurde die „Herstellung von Metallerzeugnissen“ ausgewählt.

Des Weiteren wurde das Instrument der Baukastensysteme ausgewählt, da dieses Instrument nach Meinung der Autorin (basierend auf jahrelanger praktischer Erfahrung in der Simulations-Beratung) für KMU besonders geeignet ist.

Aus der Fachliteratur wurden als spezielle Erfordernisse von KMU die

- KMU-gerechte Auswahl und Ausgestaltung der Bausteine für das Baukastensystem sowie
- niedrige Anschaffungskosten für das Simulationswerkzeug identifiziert (Rudel 2016, S. 15-17).

Im Rahmen der Dissertation Rudel (2016) wurde das Baukastensystem *KMUSimMetall* entwickelt, um die Lücke zu schließen. Dieses Baukastensystem wird im vorliegenden Beitrag näher vorgestellt.

2 Vorgehensweise

Im Folgenden wird beschrieben, wie bei der Erstellung des Baukastensystems *KMUSimMetall* vorgegangen und welche Elemente verwendet wurden.

2.1 Bisher existierende Baukastensysteme

Um die oben genannte These des fehlenden Instrumentes zu stützen, wurde zunächst eine auf Wenzel (2009) basierende Untersuchung von bereits existierenden Simulationswerkzeugen durchgeführt. Aufgelistet und untersucht wurden dabei mehr als 35 Simulationswerkzeuge.

Tabelle 1: Untersuchung der Simulationswerkzeuge basierend auf Wenzel (2009)

Simulationswerkzeug	Baukastensysteme für Produktion und Logistik enthalten?	Baukastensysteme konkret auf KMU ausgerichtet?
20-sim	nein	nein
ARENA	ja	nein
AutoMod	ja	nein
AutoShed AP	nein	nein
CASTOMAT-System	nein	nein
COSA BPM	nein	nein

COSIMIR	Vertrieb eingestellt	
d3 FACT insight	ja	nein
DOSIMIS-3	ja	nein
E-CONTROL	Unternehmen aufgelöst	
Enterprise Dynamics	ja	nein
ESPE	k. A.	k. A.
FAD	Vertrieb eingestellt	
FEMOS	k. A.	k. A.
FLEXSIM	ja	nein
iGrafx	ja	nein
ISSOP	nein	nein
MASSIMO	nein	nein
MOBILEIT-S	Vertrieb eingestellt	
ModelMaker	k. A.	k. A.
PACE	nein	nein
PacSi	ja	nein
Plant Simulation	ja	nein
Powersim	nein	nein
ProModel	ja	nein
QUEST	ja	nein
Show flow	ja	nein
SimAL	ja	nein
SIMBAX	nein	nein
SimCron Modeller	ja	nein
Simflex/3D	k. A.	k. A.
SIMPLEX 3	ja	nein
SIMPRO Java Edition	Vertrieb eingestellt	
SyteAPS/AIM	Nachfolgeprodukt: nein	Nachfolgeprodukt: nein
TPS	nein	nein
UX-SIMU	Nachfolgeprodukt: nein	Nachfolgeprodukt: nein
WAY	nein	nein
WITNESS	ja	nein

Wie aus der Tabelle 1 abzulesen ist, enthielt zum Zeitpunkt der Untersuchung (06.02.-15.02.2014) keines der Simulationswerkzeuge Baukastensysteme, welche konkret für KMU in Produktion und Logistik ausgerichtet waren (s. Rudel 2016, S. 8-11).

Des Weiteren wurden einschlägige, von Anwendern in einem Simulationswerkzeug neu erstellte Baukastensysteme für Produktion und Logistik untersucht (z. B. Zelewski 1995; Voigt 2004; Heinrich und Mayer 2006; Steinhauer 2007). Auch hier

ergab sich, dass keines dieser Baukastensysteme speziell auf die Unternehmensgröße der KMU ausgerichtet war.

Abschließend wurde das neu zu erstellende Baukastensystem von dem Referenzmodell Fertigungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK (Friedland und Kühling 2000, S. 139; Rabe und Mertins 2006) sowie dem Projekt simKMU mit dem zugehörigen Simulationswerkzeug SimWebApp (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA 2011) abgegrenzt.

2.2 Erhebung der Anforderungen

Um das Baukastensystem speziell für KMU zu entwickeln, wurden die speziellen Anforderungen der KMU im Bereich Produktion und Logistik erhoben.

Zu diesem Zweck wurden zunächst Experteninterviews mit drei ausgewählten KMU des Wirtschaftszweiges „Herstellung von Metallerzeugnissen“ (Abteilung C25 des Statistischen Bundesamtes) durchgeführt, wobei als Erhebungsinstrument das Leitfadenterview genutzt wurde. Hierbei wurden die „Anforderungen aus der Praxis der KMU“ erhoben.

Des Weiteren wurde die einschlägige Fachliteratur zum Einsatz der Prozess-Simulation in KMU systematisch ausgewertet und die „Anforderungen aus der Fachliteratur“ erarbeitet. Die Anforderungen aus der Praxis sowie die Anforderungen aus der Fachliteratur wurden in einen Anforderungskatalog überführt, der schlussendlich 39 Anforderungen enthielt (Rudel 2016, S. 84-85).

Auf Basis dieses Anforderungskataloges wurde das Baukastensystem *KMUSimMetall* entwickelt.

2.3 Beteiligte Software-Programme

Das Baukastensystem *KMUSimMetall* arbeitet mit der Business-Software Microsoft Excel und dem Simulationswerkzeug PACE. Die beiden Software-Programme sind mittels einer Datenschnittstelle gekoppelt, über die sie miteinander kommunizieren. Für die Ein- und Ausgabe von Daten durch den Anwender wird Excel genutzt, da diese Software in KMU einen „Quasi-Standard“ für den Austausch und die Verarbeitung betriebswirtschaftlich relevanter Daten darstellt.

2.4 Modellierungssprache Petri-Netze

Die Prozess-Simulation erfolgt in PACE auf der Grundlage von Petri-Netzen. Obwohl Petri-Netze in der Informatik und in der Wirtschaftsinformatik seit Langem intensiv genutzt werden, um Prozesse zu modellieren und zu analysieren (siehe <http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/index.php>), wurden sie bislang in betriebswirtschaftlichen Anwendungskontexten kaum beachtet. Daher stellt das Baukastensystem *KMUSimMetall* einen innovativen Ansatz dar, der darauf abzielt, Modellierungskonzepte und -sprachen sowie darauf basierende Software-Werkzeuge, die sich im Bereich der Informatik und Wirtschaftsinformatik bereits bewährt haben, für die betriebliche Praxis – insbesondere für KMU – zu erschließen.

Der Vorteil, den Petri-Netze gegenüber anderen Modellierungssprachen insbesondere für den Bereich Produktion und Logistik bieten, ist die Simulation auf der Ebene von

Stückgütern. Petri-Netze eignen sich daher hervorragend für die diskrete Simulation, wie sie im Bereich der Produktion und Logistik verbreitet ist.

Die höheren Petri-Netze, wie sie in PACE verwendet werden, erlauben weiterhin eine Attributierung der einzelnen „Marken“ (so werden die Stückgüter, die durch die Produktion laufen, in der Fachsprache der Petri-Netze genannt). Das heißt, dass bestimmte Eigenschaften zu jedem Zeitpunkt der Simulation von jeder Marke abgefragt werden können. So kann beispielsweise genau nachvollzogen werden, wie lange welche Marke auf welcher Bearbeitungsstation bearbeitet wurde oder wie lange die Wartezeiten vor der Bearbeitung waren. Schwankungen in der Bearbeitungszeit können tatsächlich pro Marke stochastisch verteilt in die Simulation eingebracht werden.

Ein weiterer Vorteil, den Petri-Netze gegenüber anderen Modellierungssprachen bieten, ist die geringe Anzahl von Elementen der graphischen Notation: So kann theoretisch jedes Simulationsmodell aus den nur vier Netzelementen *Stellen*, *Transitionen*, (*gerichtete*) *Kanten* und *Marken* modelliert werden (zur Hierarchisierung können bei den höheren Petri-Netzen optional als fünftes Netzelement *Module* verwendet werden). Daher werden die Petri-Netze von vielen Autoren als einfach bzw. leicht erlernbar angesehen. Auch die Autorin hält Petri-Netze insbesondere für neue und unerfahrene Anwender im Bereich der Prozess-Simulation für besonders geeignet.

Abschließend soll noch auf die mathematisch fundierte Definition, die den Petri-Netzen zugrunde liegt, hingewiesen werden. So können die Simulationsmodelle beispielsweise auf Lebendigkeit oder Deadlocks überprüft werden (Wu 2005; Kahloul et al. 2014).

3 Das Baukastensystem *KMUSimMetall*

Das Baukastensystem *KMUSimMetall* besteht aus verschiedenen Elementen, welche aus Gründen der Anwenderfreundlichkeit in einer Zip-Datei verpackt werden.

In der Vorbereitungsphase wird nach dem Entpacken der Zip-Datei zunächst das Simulationswerkzeug PACE auf dem Rechner des Anwenders installiert und der ebenfalls in der Zip-Datei enthaltene Basisbaustein hinzugeladen. In diesem Basisbaustein ist ein fertiges Simulationsmodell mit den gängigsten Bearbeitungsstationen eines typischen KMU des Wirtschaftszweigs „Herstellung von Metallerzeugnissen“ (CNC-Drehmaschinen, CNC-Fräsmaschinen, CNC-Dreh-Fräszentren, Manuelle Drehmaschinen, Manuelle Fräsmaschinen, Manuelle Bohrmaschinen, Manuelle Schleifmaschinen, Montage-Arbeitsplätze, Gleitschleifmaschinen, Prüfplätze, Externe Bearbeitung) bereits enthalten. Diese Bearbeitungsstationen können anschließend für das jeweilige Unternehmen in Art und Anzahl individuell angepasst werden.

Die folgende Abbildung 1 zeigt beispielhaft die oberste hierarchische Ebene eines so erstellten Simulationsmodells in PACE. Die oben beschriebenen Bearbeitungsstationen sind im Modul Maschinenpark (auf einer hierarchisch untergeordneten Ebene) enthalten.

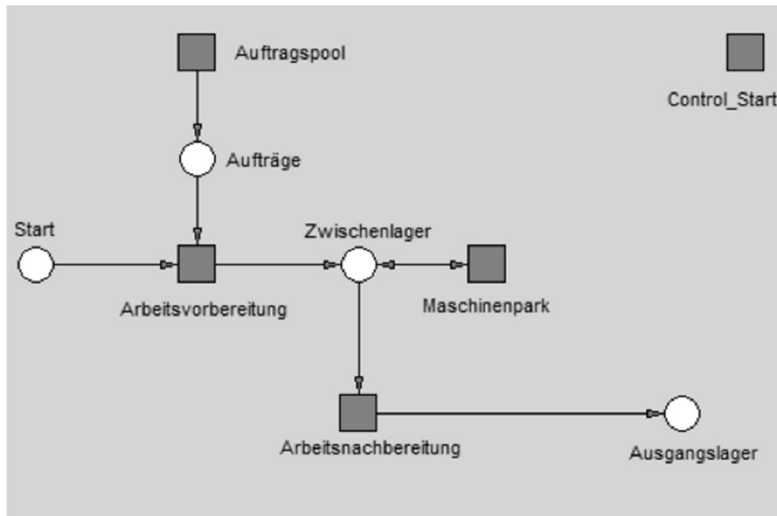


Abbildung 1: Ansicht für den Anwender aus PACE: oberste hierarchische Ebene

Die Eingabe von Daten durch den Anwender erfolgt anschließend in der Excel-Datei, welche mehrere, anwenderfreundlich gestaltete Tabellenblätter enthält. Nach Eingabe der entsprechenden Produktionsaufträge in Excel wird in PACE ein Simulationslauf gestartet. Im Simulationsmodell in PACE ist hinterlegt, dass die entsprechend benötigten Daten wie z. B. Bearbeitungsstationen, Losgrößen oder Startzeitpunkt aus Excel abgerufen werden. Nach dem Simulationslauf werden die Ergebnisse von PACE über die Datenschnittstelle zurück in die Excel-Datei geschrieben, wo sie vom Anwender abgelesen und anschließend interpretiert werden können. Für eine genauere Beschreibung der Excel-Datei sowie weitere Abbildungen siehe Rudel (2016, S. 111-122).

Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus einem der Excel-Tabellenblätter. Dort kann nach dem Simulationslauf abgelesen werden, wann die eingeplanten Lose tatsächlich fertiggestellt sein werden und auf welcher Station sich welches Los wann befindet.

ID	Start Auftrag SOLL	Start Auftrag IST	Fertigstellung SOLL	Fertigstellung IST	Produktionsplanung			
					Station 1	Start auf Station	Station 2	Start auf Station
1	12.01.15	12.01.15	27.01.15	20.01.15	cncDreh	12.01.15	cncFräß	12.01.15
2	16.01.15	16.01.15	02.02.15	26.01.15	cncDreh	16.01.15	cncFräß	16.01.15
3	27.01.15	27.01.15	11.02.15	04.02.15	cncDreh	27.01.15	cncFräß	27.01.15
4	29.01.15	29.01.15	13.02.15	06.02.15	cncDreh	29.01.15	cncFräß	29.01.15
5	06.02.15	06.02.15	23.02.15	16.02.15	cncDreh	06.02.15	cncFräß	06.02.15
6	12.02.15	12.02.15	27.02.15	20.02.15	cncDreh	12.02.15	cncFräß	12.02.15
7	24.02.15	24.02.15	11.03.15	04.03.15	cncDreh	24.02.15	cncFräß	24.02.15
8	27.02.15	27.02.15	16.03.15	09.03.15	cncDreh	27.02.15	cncFräß	27.02.15
9	12.03.15	12.03.15	27.03.15	20.03.15	cncDreh	12.03.15	cncFräß	12.03.15
10	20.03.15	20.03.15	08.04.15	30.03.15	cncDreh	20.03.15	cncFräß	20.03.15
11	24.03.15	24.03.15	10.04.15	01.04.15	cncDreh	24.03.15	cncFräß	24.03.15

Abbildung 2: Ausschnitt aus dem Excel-Tabellenblatt Ergebnisse_Aufträge

In der Abbildung 3 ist ein Ausschnitt eines weiteren Excel-Tabellenblattes zu sehen. Aus diesem Tabellenblatt kann nach dem Simulationslauf die tatsächliche Auslastung der Bearbeitungsstationen direkt abgelesen werden.

Kategorie Bearbeitungsstation	Bearbeitungszeit		Wartezeit		Anzahl
	Zeit (Min.)	in %	Zeit (Min.)	in %	
cncDreh	3041,6 Min.	1,7 %	175887,2 Min.	98,1 %	4
cncFräß	5700,0 Min.	4,3 %	128496,6 Min.	95,6 %	3
cncDrehFräß	0,0 Min.	0,0 %	44827,2 Min.	100,0 %	1
manDreh					0
manFräß					0
manBohr	11450,2 Min.	12,8 %	78109,2 Min.	87,2 %	2
manSchleif	0,0 Min.	0,0 %	44827,2 Min.	100,0 %	1
gleitSchleif			87374,4 Min.	97,5 %	2
montage	15147,2 Min.	16,9 %	74222,2 Min.	82,8 %	2
prüf	1141,0 Min.	2,6 %	43686,2 Min.	97,5 %	1
extern			26587,2 Min.	59,4 %	1

Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Excel-Tabellenblatt *Ergebnisse_Stationen*

In der Dissertation wird das Vorgehen zum Erstellen eines Simulationsmodelles, zur Durchführung der Simulationsläufe sowie zur Auswertung der Daten genauer erläutert (Rudel 2016, S. 129-154).

Um die Anwendung des Instrumentes möglichst einfach zu gestalten, ist der Zip-Datei ein Nutzerhandbuch beigelegt. Dieses beschreibt auf 29 Seiten Schritt für Schritt in der Sprache des Anwenders

- den Aufbau und die Bestandteile des Baukastensystems,
- die Vorbereitungen zur Nutzung des Baukastensystems,
- die Durchführung eines Simulationslaufes sowie
- die Anpassung des Baukastensystems an das eigene Unternehmen.

4 Mögliche Anwendungsbeispiele

Mit dem Baukastensystem *KMUSimMetall* können typische Fragestellungen, wie sie in einem KMU des Wirtschaftszweigs „Herstellung von Metallerzeugnissen“ vorkommen, direkt beantwortet werden. So können beispielsweise die Auslastung von Bearbeitungsstationen, Fertigstellungstermine von Aufträgen oder auch Schwankungen von Rüstzeiten untersucht werden.

In Abbildung 3 ist beispielsweise zu sehen, dass die Wartezeiten der verschiedenen Bearbeitungsstationen recht hoch sind – die Produktion scheint auf den ersten Blick also noch Kapazitäten frei zu haben.

In dem Beitrag Rudel et al. (2017) werden zwei typische Fragestellungen, wie sie in KMU auftreten können, mit Hilfe des Baukastensystems *KMUSimMetall* aufgegriffen. Dort geht es zum einen um die Fragestellung, ob ein Mitarbeiter an einem bestimmten Tag einen Gleittag nehmen kann (der Mitarbeiter ist für die Qualitätssicherung zuständig, und es wird mit Hilfe des Baukastensystems geprüft, ob an dem betreffenden Tag eine Qualitätsprüfung ansteht). Zum anderen wird die Frage

aufgegriffen, wie hoch die Auslastung der einzelnen Bearbeitungsstationen im Unternehmen ist.

Im vorliegenden Beitrag werden stellvertretend zwei weitere Fragestellungen herausgegriffen, um mögliche Anwendungen des Baukastensystems *KMUSimMetall* aufzuzeigen.

4.1 Basisbefüllung für die Anwendungsbeispiele

Im vorliegenden Beispiel wird von einer Lohnfertigung ausgegangen, bei der ein Unternehmen Spezialteile (Halterungen) für einen Hersteller von Kamerastativen fertigt. Daher erhält das Unternehmen den gleichen Auftrag von einem Auftraggeber immer wieder in unregelmäßigen Abständen in einer gleichbleibenden Stückzahl von 200 Teilen und bearbeitet diese. Für die Aufträge wird von dem Unternehmen jeweils eine Fertigstellung nach 10 Werktagen ab Teileanlieferung durch den Auftraggeber zugesagt (Rudel 2016, S. 137). Die Bearbeitung wird zunächst unternehmensintern auf der CNC-Drehmaschine, der CNC-Fräsmaschine, der manuellen Bohrmaschine und der Gleitschleifmaschine bearbeitet. Danach werden die Teile zur externen Bearbeitung außer Haus gegeben und abschließend wieder unternehmensintern montiert (Rudel 2016, S. 138).

Diese Daten sowie weitere Informationen (wie beispielsweise tägliche Betriebszeiten) werden in der Excel-Datei erfasst.

4.2 Anwendungsbeispiel: Fertigstellungstermin eines Auftrags

Bei dieser Fragestellung wird untersucht, ob ein Auftrag ausnahmsweise bereits vor dem zugesagten Fertigstellungstermin (10 Tage ab Teileanlieferung durch den Auftraggeber, siehe oben) vom Auftraggeber abgeholt werden kann. Grund dafür ist ein Engpass in der Produktion des Auftraggebers.

Um diese Fragestellung zu beantworten, wird der Fertigungsplan in der Excel-Datei hinterlegt und anschließend ein Simulationslauf in PACE gestartet. Nach Abschluss des Simulationslaufes wird wiederum die Excel-Datei, in das PACE die Ergebnisse der Simulation schreibt, geprüft.

Anhand der Simulationsergebnisse kann abgelesen werden, wann der Auftrag laut der Simulation fertiggestellt sein wird. Sollte dieser Termin vor dem angefragten Fertigstellungstermin liegen, kann der Auftrag ausnahmsweise früher vom Auftraggeber abgeholt werden.

Dieses Anwendungsbeispiel zeigt, wie das Baukastensystem KMU bei kurzfristigen Änderungsanfragen bezüglich der Produktionsplanung unterstützen kann.

4.3 Anwendungsbeispiel: Zusätzlicher Auftrag

Bei dieser Fragestellung wird hinterfragt, ob ein zusätzlicher Auftrag angenommen werden kann, ohne dass sich die zugesagten Fertigstellungstermine der anderen, bereits eingeplanten Aufträge verschieben.

Um diese Fragestellung beantworten zu können, wird wiederum der Fertigungsplan der bereits eingeplanten Aufträge in der Excel-Datei hinterlegt. Anschließend wird

ein Simulationslauf durchgeführt und die Excel-Datei mit den von PACE eingetragenen Ergebnissen unter einem anderen Namen gespeichert.

Anschließend wird die Excel-Datei um den zusätzlichen Auftrag ergänzt und erneut ein Simulationslauf durchgeführt. Durch den Vergleich der so erzeugten Simulationsergebnisse in Excel mit der zuvor gespeicherten Excel-Datei sind die Auswirkungen des zusätzlichen Auftrages im Detail ablesbar.

Dieses Anwendungsbeispiel zeigt auf, wie mit Hilfe des Baukastensystems die Auswirkungen eines zusätzlichen Auftrages auf die Produktionsplanung geprüft werden kann. So können beispielsweise Verschiebungen von Fertigstellungsterminen oder auch Veränderungen in der Auslastung der Maschinen aufgezeigt werden.

5 Aktueller Stand und Ausblick

Mit dem Baukastensystem *KMUSimMetall* wurde ein Instrument speziell für KMU geschaffen, um diese beim Einsatz der Prozess-Simulation zu unterstützen. Das Baukastensystem wird interessierten Unternehmen kostenfrei zur Verfügung gestellt. Damit kann das Baukastensystem einen wichtigen Beitrag leisten, die KMU in Deutschland bei der Digitalisierung der Industrie zu unterstützen. Im nächsten Schritt ist geplant, das Baukastensystem im Rahmen von weiteren Fallstudien in der Praxis der Unternehmen zu testen. Hierzu sind ab Herbst 2017 Studentarbeiten an der Fakultät für Informatik der Universität der Bundeswehr München in Zusammenarbeit mit Praxispartnern geplant. Sollte sich das Baukastensystem in der Praxis der Unternehmen bewähren, ist ab 2018 die Weiterentwicklung (beispielsweise durch die Erweiterung um neue Funktionen sowie die Anpassung auf andere Wirtschaftszweige) geplant.

Literatur

- agiplan GmbH (Hrsg.): Erschließung der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Mülheim an der Ruhr: agiplan GmbH, Fraunhofer IML, ZENIT GmbH 2015.
- Bierschenk, S.; Kuhlmann, T.; Ritter, A.: Stand der Digitalen Fabrik bei kleinen und mittelständischen Unternehmen: Auswertung einer Breitenbefragung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.
- Bös, M.: Methoden der Digitalen Fabrikplanung: ein praxisorientierter Ansatz für KMU. In: Rabe, M. (Hrsg.): *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008, S. 407-415.
- Dettmering, H.; Naß, A.; Reiter, R.: Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik für den Mittelstand. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) 5, S. 489-493.
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) (Hrsg.): Abschlussbericht *simKMU – Internet- und webbasierte Simulationsdienste: Forschungsergebnisse im Teilvorhaben „Grundlagen, Konzeption und Intralogistik“* des Verbundprojekts *simKMU*. Stuttgart: Fraunhofer IPA 2011.
- Friedland, R.; Kühling, M.: Referenzmodell für Fertigungssysteme. In: Wenzel, S. (Hrsg.): *Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik*. Ghent: SCS-Europe BVBA 2000, S. 133-150.

- Heinrich, S.; Mayer, G.: Ablaufsimulation im VDA – Ein Bericht aus der Arbeitsgruppe.. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik, Tagungsband zur 12. ASIM-Fachtagung. San Diego: SCS Publishing House, 2006, S. 423-428.
- Kahloul, L.; Bourekkache, S.; Djouani, K.; Chaoui, A.; Kazar, O.: Using High Level Petri Nets in the Modelling, Simulation and Verification of Reconfigurable Manufacturing Systems. *International Journal of Software Engineering & Knowledge Engineering* 24 (2014) 3, S. 419-443.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin: Springer 2012.
- Rabe, M.; Hellingrath, B. (Hrsg.): Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik: Ein Leitfaden mit Beispielen für kleinere und mittlere Unternehmen. San Diego: SCS International 2001.
- Rabe, M.; Mertins, K.: Fraunhofer Simulation Reference Models. In: Bernus, P.; Mertins, K.; Schmidt, G. (Hrsg.): Handbook of Architectures of Information Systems. Berlin: Springer 2006, S. 693-704.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin: Springer 2008.
- Rudel, S.: Prozess-Simulation in KMU: Entwicklung und Analyse eines Petrinetz-basierten Baukastensystems als Instrument zur Modellierung und Simulation von Produktions- und Logistikprozessen – speziell ausgelegt zur Unterstützung von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2016.
- Rudel, S.; Schimmel, M.; Zelewski, S.: Prozess-Simulation in kleinen und mittleren Unternehmen. *productivITy* (2017) 1, S. 31-33.
- Spieckermann, S.: Diskrete, ereignisorientierte Simulation in Produktion und Logistik – Herausforderungen und Trends. In: Schulze, T.; Hoton, G.; Preim, B.; Schlechtweg, S. (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 2005 – SimVis. Erlangen: SCS Publishing House 2005, S. 3-14.
- Spieckermann, S.: Durchgängige Planungsbegleitung mit Simulation im Mittelstand. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 103 (2008) 1-2, S. 83-85.
- Steinhauer, D.: Simulation im Schiffbau und Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar. In: Franz, V. (Hrsg.): Simulation in der Bauwirtschaft. Kassel: Kassel University Press 2007, S. 1-13.
- Voigt, T.: Neue Methoden für den Einsatz der Informationstechnologie bei Getränkeabfüllanlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.
- Wenzel, S.: Modellbildung und Simulation in Produktion und Logistik – Stand und Perspektiven. In: Elst, G. (Hrsg.): Tagungsband zum ASIM-Treffen STS/GMMS 2009. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2009, S. 7-16.
- Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin: Springer 2008.
- Wu, Z.M.: Modelling and simulation of an intelligent flexible manufacturing system via high-level object Petri nets (HLOPN). In: *International Journal of Production Research* 43 (2005) 7, S. 1443-1463.
- Zelewski, S.: Petrinetz-basierte Modellierung komplexer Produktionssysteme: Band 5.1: Einführung in Synthetische Netze – Das Kernkonzept Synthetischer Netze. Leipzig, Universität Leipzig, Institut für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft, 1995.