

CHRISTIAN BLOCK

**METHODIK ZUR TEILAUTONOMEN
MODELLIERUNG UND EREIGNIS-
DISKRETE SIMULATION IN CPPS
ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG
IN DER PLANUNG MIT DEM
DIGITALEN ZWILLING**



**Methodik zur teilautonomen Modellierung und
ereignisdiskreten Simulation in CPPS**

***Entscheidungsunterstützung in der Planung
mit dem Digitalen Zwilling***

Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Maschinenbau

der Ruhr-Universität Bochum

von

Christian Block

aus Schwelm

Bochum 2019

Dissertation eingereicht am: 18.11.2019

Tag der mündlichen Prüfung: 21.02.2020

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. Dettlef Gerhard

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme

Band 1/2020

Christian Block

**Methodik zur teilautonomen Modellierung
und ereignisdiskreten Simulation in CPPS**

Entscheidungsunterstützung in der Planung
mit dem Digitalen Zwilling

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7303-4

ISSN 1430-7324

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„Wenn nicht jetzt, wann dann?“

HÖHNER - Album 6:0, Track 2, 2005

Vorwort

Diese Arbeit entstand durch die Erfahrungen und Erkenntnisse in den Projekten SOPHIE und Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Siegen, die ich als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssysteme in der Fakultät Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum mit bearbeiten durfte. Daher gilt mein Dank zunächst allen KollegInnen am Lehrstuhl mit besonderem Gruß an die Arbeitsgruppe Produktionsmanagement.

Herausstellen möchte ich an erster Stelle jedoch die Professoren, die mich bei der wissenschaftlichen Ausgestaltung dieser Arbeit begleitet und unterstützt haben. Dazu zählt mein Doktorvater, Herr Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, dem ich für die Betreuung und Unterstützung des ausgewählten Themas sowie für die ermöglichte flexible Gestaltung dieser Arbeit danke. Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard für die unkomplizierte Übernahme des Koreferates. Besonderer Dank geht zudem an Prof. Dr.-Ing. Dieter Kreimeier für das stets entgegengebrachte Vertrauen und die Hilfsbereitschaft sowie die zigtausend unterhaltsamen Autobahnkilometer zu Projektpartnern.

Die Ideen zu dieser Arbeit basieren unter anderem auf den Ergebnissen und dem von mir gezogenen Fazit aus kritischen Diskussionen der Arbeiten im Projekt SOPHIE. Daher geht mein Dank auch an alle beteiligten Personen und Kollegen der Projektpartner SimPlan AG, GEFASOFT GmbH, Vorwerk Elektrowerke GmbH & Co. KG, FESTO AG & Co. KG, Volkswagen Sachsen GmbH, GROB-WERKE GmbH & Co. KG, Festo Lernzentrum Saar GmbH, Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb an der TU Chemnitz und Gemeinsame Arbeitsstelle RUB/IGM. Ein besonderes Dankeschön geht hiermit an die Lehrstuhl-Kollegen Dr.-Ing. Friedrich Morlock, Dr.-Ing. Niklas Breitkopf, Dr.-Ing. Björn Krückhans und Dominik Lins M. Sc. für die fachlichen Gespräche im Projekt, aber noch viel mehr für die spannende Zeit als Mentoren und Büropartner.

Mein persönlich angestrebtes Ziel ist es, bestehende Probleme zu lösen. Ich wünsche mir, dass das in dieser Arbeit erarbeitete Konzept und die dokumentierte Vorgehensweise angewendet oder weiterentwickelt wird, um damit einen Beitrag zur Forschung, aber auch einen Mehrwert für den Produktionsstandort Deutschland zu generieren.

Besonders herzlich danke ich meiner Familie, meinen Eltern Andrea und Wolfgang, meiner Schwester Carolin und meiner Freundin Natascha für die uneingeschränkte Unterstützung auf dem Weg zu dieser Arbeit und ganz besonders während der Bearbeitung und Fertigstellung. Ich danke ihnen für das Ertragen von nervenaufreibenden Stunden, hilfreichen Diskussionen und der Ablenkung von quälenden Fragestellungen. Ohne ihre Unterstützung wäre diese Arbeit in dieser Art und Weise nicht möglich gewesen. Vielen Dank!

Liste der Veröffentlichungen

BLOCK, C.; KUHNENKÖTTER, B. (2019): Digital Factory Implementation Approach Starting from the Macroscopic Perspective with an Example for Holistic Planning in Assembly Systems. In: SCHMITT, R.; SCHUH, G. (Hg.): Advances in Production Research. Cham: Springer International Publishing, S. 178-187. ISBN 9783030034504. DOI: 10.1007/978-3-030-03451-1_18.

BLOCK, C.; KUHNENKÖTTER, B. (2018): Ereignisdiskrete Simulationsumgebung zur Entscheidungsunterstützung in der Produktion – Ein KMU tauglicher Ansatz. In: RIEDEL, R. (Hg.): Tagungsband „Smarte Produktion und digitale Vernetzung“. Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme. Sonderheft 24, S. 141-152.

BLOCK, C., LINS, D.; KUHNENKÖTTER, B. (2018): Approach for a simulation-based and event-driven production planning and control in decentralized manufacturing execution systems. Procedia CIRP, 72, S. 1351-1356. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.204.

BLOCK, C., KREIMEIER, D.; KUHNENKÖTTER, B. (2018): Holistic approach for teaching IT skills in a production environment. Procedia Manufacturing, 23, S. 57-62. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.161.

BLOCK, C. (2018): Agentensystem. In: K. HERRMANN, K.; KREIMEIER D. (Hg.): Entscheidungsunterstützung in der Produktionsplanung und -steuerung. Kompendium zum Forschungsprojekt SOPHIE. Aachen: Shaker Verlag, S. 28-37. ISBN 9783844058529.

BLOCK, C.; BURGES, U. (2018): Einheitliches Datenmodell. In: HERRMANN, K.; KREIMEIER D. (Hg.): Entscheidungsunterstützung in der Produktionsplanung und -steuerung. Kompendium zum Forschungsprojekt SOPHIE. Aachen: Shaker Verlag, S. 38-45. ISBN 9783844058529.

BLOCK, C.; KUHNENKÖTTER, B. (2018): Blockchain in der Produktion. Ein Ansatz zur manipulationsfreien sowie dezentralen Speicherung von Daten in der Montage von Morgen. Industrie 4.0 Management, (2), S. 21-24.

BLOCK, C.; KUHNENKÖTTER, B.; FRANK, T.; BURGES, U. (2017): Online-Materialflusssimulationen zur Entscheidungsunterstützung in der PPS. Ein agentenbasierter Ansatz zur Vernetzung vorhandener IT-Systeme zum autonomen Datenaustausch. Productivity management, 22 (1), S. 28-30.

BLOCK, C.; MORLOCK, F.; KUHLENKÖTTER, B. (2016): Ganzheitliche flexible Vernetzung durch Erweiterung bestehender IT-Strukturen zu Serviceorientierten Architekturen mithilfe von Agentensystemen zur humanzentrierten Entscheidungsunterstützung – Ein Konzept zur RAMI Umsetzung. In: SCHLICK, C.M. (Hg.): Megatrend Digitalisierung. Potentiale der Arbeits- und Betriebsorganisation. Schriftenreihe der Wissenschaftliche Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V. Berlin: Gito, S. 231-257. ISBN: 9783955451851.

FRANK, T.; ROMERO-LÓPEZ, M.; BLOCK, C.; MORLOCK, F.; KUHLENKÖTTER, B.; BURGESS, U.; STEINMETZ, W. (2016): Agent-based communication to map and exchange shop floor data between MES and material flow simulation based on the open standard CMSD. IFAC-PapersOnLine, 49 (12), S. 1526-1531. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.796.

BLOCK, C.; MORLOCK, F.; KREIMEIER, D.; KUHLENKÖTTER, B. (2016): Agentensysteme als Befähiger für Materialflusssimulationen. Automatisierung von Materialflusssimulationen mit Hilfe von Agentensystemen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 111 (3), S. 118-121. DOI: 10.3139/104.111485.

BLOCK, C., MORLOCK, F., DORKA, T.; KUHLENKÖTTER, B. (2016): A Human Centered Multi-Agent-System for Production Planning and Control. In: SCHÜPPSTUHL, T.; TRACHT, K.; FRANKE, J. (Hg.): Applied Mechanics and Materials: Trans Tech Publications, 840, S. 132-139. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.840.132

BLOCK, C.; MORLOCK, F.; KREIMEIER, D.; KUHLENKÖTTER, B. (2015): Intelligente Systemvernetzung durch Agentensysteme zur ganzheitlichen dezentralen Produktionsplanung und -steuerung. In: MÜLLER, E. (Hg.): Planung und Betrieb von Produktionssystemen im digitalen Zeitalter - Vernetzt planen und produzieren (VPP). Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, S. 207-216.

BLOCK, C.; FREITH, S.; KREGGENFELD, N.; MORLOCK, F.; PRINZ, C.; KREIMEIER, D.; KUHLENKÖTTER, B. (2015): Industrie 4.0 als soziotechnisches Spannungsfeld. Ganzheitliche Betrachtung von Technik, Organisation und Personal. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 110 (10), S. 657-660. DOI: 10.3139/104.111402.

UNGER, H.; BÖRNER, F.; EISELT, T.; JENTSCH, D.; MORLOCK, F.; BLOCK, C.; MÜLLER, E.; KREIMEIER, D. (2015): Matching Information Demand and Device Interacting Capabilities in Industry 4.0 Environments. In: ODUOZA, C.F. (Hg.): Proceedings of the 25th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM). Wolverhampton, United Kingdom: The Choir Press, S. 332-338. ISBN: 9781910864005.

KREIMEIER, D.; MÜLLER, E.; MORLOCK, F.; JENTSCH, D.; UNGER, H.; BÖRNER, F.; BLOCK, C. (2015): Die synchrone Produktion. Ansatz mit teilautonomer Produktionsplanung/-steuerung und humanzentrierter Entscheidungsunterstützung. *wt Werkstattstechnik online*, 105 (4), S. 204-208.

MORLOCK, F.; BLOCK, C.; MEIER, H. (2014): Zielableitung für Serviceanbieter im Maschinenbau. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 109 (12), S. 923-926. DOI: 10.3139/104.111258.

Kurzfassung

Die Produktion bildet eine der zentralen Säulen unseres Wohlstandes. Doch die Randbedingungen in global vernetzten und volatilen Märkten nehmen zu und ändern sich fortlaufend. Besonders die Planung der durchzuführenden Tätigkeiten sowie deren anschließende Ausführung und Steuerung stehen hierdurch vor zunehmenden Herausforderungen. Als Hilfsmittel werden seit vielen Jahren Werkzeuge der Digitalen Fabrik empfohlen. Ein etabliertes Werkzeug ist die ereignisdiskrete Simulation zur Entscheidungsunterstützung in der Fabrik- und Produktionsplanung geworden. Des Weiteren werden Simulationen auch als wichtiges Werkzeug zur Umsetzung weiterer Digitalisierungsmaßnahmen im Kontext von Industrie 4.0 gesehen. Auf Basis eines detaillierten Abbilds sollen mithilfe von Simulationen Szenarien evaluiert und durch eine Rückkopplung die ermittelten Parameter in die Realität zurückgespielt werden.

Heute fehlen hierfür jedoch Standards, Werkzeuge und Vorgehensweisen zur einheitlichen und vereinfachten Modellierung sowie geeignete Simulationsumgebungen zur aufwandsreduzierten Simulationsdurchführung. Solche Standards und geeignete Werkzeuge werden im Hinblick auf die automatisierte Erstellung eines Digitalen Schattens als virtuelles Echtzeit-Abbild der Realität sowie dessen Erweiterung um ein Prozessmodell zu einem Digitalen Zwilling umso wichtiger.

Als Vorarbeit entstand hierzu ein grundlegendes Vorgehensmodell für die Einführung einer durchgängigen Digitalen Fabrik auf Basis standardisierter Austauschformate und Schnittstellen. Zur Umsetzung des ersten Teils dieses Modells wird in dieser Arbeit, nach dem Top-Down Ansatz beginnend, mit einem makroskopischen Blick auf die Produktionsprozesse eine Industrie 4.0-taugliche Simulationsumgebung vorgestellt. Die entwickelte Methodik besteht dabei aus fünf Teillösungen. Im Detail wurde eine einheitliche Semantik und Syntax auf Basis von CMSD inklusive des Austausches mittels HTTP, MQTT sowie OPC-UA entwickelt. Die Daten können in cyber-physischen (Produktions-)Systemen generiert, einheitlich ausgetauscht sowie aggregiert werden. Dies ermöglicht die Erstellung eines Digitalen Schattens mit allen vorherrschenden Entitäten. Zur Entscheidungsunterstützung in der Produktionsplanung und -steuerung können die Daten in ein ausgewähltes Simulationswerkzeug überführt werden. Dort werden die Daten automatisch zu einem ausführbaren Modell transformiert sowie simuliert und die Ergebnisse zurückgespielt. Der so geschaffene Digitale Zwilling ermöglicht eine Evaluierung von Planungsszenarien.

Im Rahmen des Forschungsprojektes SOPHIE konnten Teile dieser Arbeit in industriellen Pilotbereichen die praxistaugliche Anwendbarkeit belegen. Alle Teillösungen der in dieser Arbeit entwickelten Methodik wurden zudem softwaretechnisch umgesetzt und konnten erfolgreich in der Lern- und Forschungsfabrik des Lehrstuhls für Produktionssysteme an der Ruhr-Universität Bochum validiert werden.

Schlagwörter: Industrie 4.0, Entscheidungsunterstützung, Simulation, PPS

Abstract

Production is one of the central pillars of our prosperity. However, the boundary conditions in globally connected and volatile markets are increasing and constantly changing. In particular, the planning of activities which have to be carried out as well as their subsequent execution and control face increasing challenges. Thus, in order to face these challenges, the Digital Factory offers several tools. Event-discrete simulation has become an established tool for decision-making support in factory and production planning. Furthermore, simulation is an important tool for implementing further digitization measures in context of Industrie 4.0. Based on detailed images, simulations are used to evaluate scenarios. Subsequently, the identified parameters can be returned to reality.

Today, standards, tools and procedures for a uniform and simplified modeling are lacking. Also, suitable simulation environments for a cost efficient simulation are rather rare. Such standards and suitable tools are all the more important with regard to the automated creation of a Digital Shadow as a virtual real-time image of reality and its extension by a process model to a Digital Twin.

As preliminary work, a basic procedure model was developed for the introduction of an integrated Digital Factory based on standardized exchange formats and interfaces. In order to implement the first part of this model, based on the top-down approach a macroscopic view of production processes will be used to present an Industrie 4.0-suitable simulation environment. For this, a methodology of five partial solutions was developed. In detail, a uniform semantics and syntax based on CMSD including the data exchange using HTTP, MQTT and OPC-UA was developed. Data can be generated in cyber-physical (production) systems, uniformly exchanged and aggregated. This allows the creation of a Digital Shadow with all existing entities. For decision-making support in production planning and control, the data can be transferred to a selected simulation tool. There, the data is automatically transformed into an executable model and simulated. Afterwards, the simulation results are returned to the user. Thus, the created Digital Twin enables the evaluation of planning scenarios.

The practical applicability of this work with focus on generating CMSD as well as the interpretation in a simulation tool could be proven in industrial pilot areas within the scope of the research project SOPHIE. Furthermore, all partial solutions of the developed method in this work were implemented in terms of software technology and could be validated successfully in the learning and research factory of the chair of production systems at the Ruhr-University Bochum.

Keywords: Industrie 4.0, decision support, simulation, PPC

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Lösungsansatz	5
1.3	Aufbau der Arbeit	6
2	Grundlagen und Eingrenzung des Lösungsraums	9
2.1	Grundlegende Begrifflichkeiten	9
2.2	Planung in Produktionssystemen	14
2.2.1	Produktionssysteme	14
2.2.2	Planung im Kontext des Produktionsmanagements	16
2.2.3	Automatisierung der Planung	19
2.3	Digitale Fabrik	22
2.3.1	Definition der Digitalen Fabrik	22
2.3.2	Simulation in der Digitalen Fabrik	24
2.4	Industrie 4.0	27
2.4.1	Charakteristika von Industrie 4.0	28
2.4.2	Konzepte von Industrie 4.0	29
2.5	Besonderheiten in KMU	31
2.6	Zwischenfazit und Ableitung der Forschungsfragen	33
2.6.1	Eingrenzung des Lösungsraums	34
2.6.2	Zwischenfazit	35
2.6.3	Resultierende Fragestellungen	36
3	Stand der Forschung und Technik	37
3.1	Referenzarchitekturen und Standards	37
3.1.1	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0	37
3.1.2	Kommunikationsstandards	39
3.1.3	Informationsmodelle	42
3.2	Relevante Ansätze aus der Forschung	48
3.2.1	Ansätze zur Planungsunterstützung und -automatisierung	49
3.2.2	Ansätze zur Modellierungs- und Simulationsunterstützung	51
3.2.3	Weitere Ansätze	60
3.3	Relevante kommerzielle Lösungen	61
4	Handlungsbedarf	65
4.1	Bewertung der bestehenden Ansätze	65
4.2	Vision zur Digitalen Fabrik in CPPS	69
4.3	Forschungsfragen und Ziel der Arbeit	72
5	Methodik zur teilautonomen Modellierung und Simulation in CPPS	77

5.1 Teillösung 1: Einheitliche Semantik und Syntax	78
5.1.1 CMSD-Konzeptansicht	78
5.1.2 CMSD XML Schema Definition	82
5.1.3 Konzepte zur Modellierung mittels CMSD	86
5.1.4 Vorgehensmodell zur Erstellung einer CMSDDocument-Instanz	112
5.1.5 Konfiguration von Experimenten	114
5.1.6 Darstellung von Ergebnissen	115
5.2 Teillösung 2: Erstellung von Modelleingangsdaten und Teilmodellen in CPPS	118
5.2.1 CMSD-Connector für CPPS und die RAMI 4.0 Verwaltungsschale	119
5.2.2 Mapping zwischen AutomationML und CMSD	120
5.3 Teillösung 3: Datensammlung und Aggregation von Modellen	121
5.3.1 Identifikation von Objekten und Attributen im CMSDDocument	123
5.3.2 Austausch von CMSD mittels HTTP	124
5.3.3 Austausch von CMSD mittels MQTT	125
5.3.4 Austausch von CMSD mittels OPC-UA	125
5.4 Teillösung 4: Automatische Generierung des Simulationsmodells	127
5.4.1 Auswahl eines Simulationswerkzeugs	128
5.4.2 Import und Interpretation von CMSD	129
5.5 Teillösung 5: Entscheidungsunterstützung durch Szenariovalidierung	134
5.5.1 Definition von Szenarien	135
5.5.2 Ergebnisexport	135
5.5.3 Ergebnisdarstellung	136
6 Prototypische Implementierung	137
6.1 Anforderungen an den Prototyp	137
6.2 Übergeordnete Lösungsentscheidungen	138
6.3 Implementierung der Informationsmodelle	140
6.4 Rahmenwerk des CMSD-Connectors für CPPS	141
6.5 Implementierung des Datenaustausches	142
6.6 Implementierung des Simulationswerkzeugs	145
6.6.1 CMSD-Interpretation in Plant Simulation	145
6.6.2 CMSD-Interpretation in DESMO-J	148
6.7 Graphische Oberflächen zur Manipulation und Visualisierung	153
6.8 Zwischenfazit	157
7 Evaluierung des entwickelten Ansatzes	159
7.1 Industrielle Evaluierung im Rahmen von SOPHIE	159
7.2 Evaluierung in der Lern- und Forschungsfabrik des LPS	160
7.2.1 Evaluierung im Rahmen von SOPHIE	161
7.2.2 Interpretation des Digitalen Schattens der Unilock-Produktion in DESMO-J	165
7.2.3 Digitaler Zwilling der Klemmleistenmontage	169

7.3 Reflexion der erarbeiteten Lösung	173
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	175
8.1 Zusammenfassung.....	175
8.2 Ausblick.....	177
Anhang	181
Abkürzungsverzeichnis.....	211
Abbildungsverzeichnis.....	217
Tabellenverzeichnis.....	223
Literaturverzeichnis.....	225
Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme	267
Lebenslauf.....	275