

Simulationskonzept zur Nutzenvalidierung  
cyber-physischer Systeme  
in komplexen Fabrikumgebungen

Sander Lass

Sander Lass  
lass@wi.uni-potsdam.de

**ISBN 978-3-95545-224-7**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Veröffentlicht im GITO Verlag 2018  
Gedruckt und gebunden in Berlin 2018

© **GITO mbH Verlag Berlin 2018**

GITO mbH Verlag  
für Industrielle Informationstechnik und Organisation  
Detmolder Straße 62  
10715 Berlin  
Tel.: +49.(0)30.41 93 83 64  
Fax: +49.(0)30.41 93 83 67  
E-Mail: [service@gito.de](mailto:service@gito.de)  
Internet: [www.gito.de](http://www.gito.de)



# Geleitwort

Die Basis für Industrie 4.0 bilden cyber-physische Systeme. Allerdings besteht bisher keine Klarheit darüber, wie der Nutzen des Einsatzes cyber-physischer Systeme in realen Produktionszusammenhängen validiert werden kann. Die Arbeit von Herrn Dr. Lass adressiert diesen Mangel. Die Dissertation beschreibt einen simulationsbasierten Ansatz und dessen Realisierung. In Form einer hybriden Simulationsumgebung steht als Ergebnis ein Werkzeug zur Verfügung, welches die Analyse hinsichtlich der geeigneten Ausgestaltung von cyber-physischen Produktionssystemen gestattet. Ein simulativer Ansatz erscheint besonders geeignet, da Experimente am Originalsystemen im Fabrikkontext häufig nur schwer durchführbar sind.

Das systematische Vorgehen des Autors beginnt mit der Explikation der wesentlichen Elemente des Diskursbereichs – Unternehmen und Produktionssystem, Informationssysteme in der Fabrik sowie cyber-physische Systeme und Fabriksimulation – und dessen Besonderheiten. Die anschließende Anforderungsanalyse liefert nicht nur die Erkenntnis, wie die Nutzvalidierung des Einsatzes cyber-physischer Systeme erfüllt werden kann, sondern zeigt ebenfalls anhand von 15 Lern- oder Modellfabrikansätzen des deutschsprachigen Raums, dass aktuelle Ausprägungen noch nicht die notwendigen Anforderungen für die intendierte Nutzenbetrachtung cyber-physischer Systemkomponenten in ausreichendem Maße erfüllen.

Die Defizite aufgreifend konzeptioniert Herr Dr. Lass eine Forschungsplattform und beschreibt, wie aus Sicht des Anwenders und aus Sicht der Systemarchitektur ein sinnvolles Systemdesign und die modellhafte Darstellung der wesentlichen Systemelemente aussehen könnte. Mit der Implementierung detailliert der Autor die Architektursicht und die wesentlichen Komponenten der hybriden Simulationsumgebung, die sogenannten Cubes, und deren Zusammenspiel mit dem Transportsystem. Die sehr hohe Qualität der Realisierung zeichnet sich nicht nur durch ihre Ar-

---

chitekturbasiertheit aus, sondern auch dadurch, dass es dem Autor gelungen ist, zahlreiche in der Praxis existierende Realweltkonzepte, wie ein BDE-System, eine Steuerung der Logistikanlage und die Fördertechnik selbst in das Konzept der hybriden Simulation einzubinden. Bei der insgesamt sehr gut dargestellten Konzeption der Arbeit sollte zusätzlich lobend erwähnt werden, dass der Autor eine Hardwarekomponente entwickelt hat, die sogenannte Industrie4.0-Box. Mit ihr wird es möglich, Realweltkomponenten, wie Förderanlagen, mit dem hybriden Simulator zu verbinden.

Ein Praxisbeispiel zeigt die Anwendung der Simulationsplattform anhand eines Produktionssystems aus der Herstellung von Produkten für den Baubereich. Es ist ebenfalls wesentlicher Teil der Validierung. Dahingehend erfolgen Modellierung, Simulation und abschließender Ergebnisvergleich zwischen dem realen Prozess und dem modellierten Prozess für drei Anwendungsfälle. Der Autor führt eine Datenerhebung durch und zeigt einen Vergleich zwischen dem realen Ablauf des Prozesses und dem in der Simulation dargestellten Ablauf des Prozesses. Er weist in außerordentlich überzeugender Weise nach, dass die Simulation den realen Ablauf des Prozesses sehr gut abbildet. Von daher ist die Arbeit als außerordentlich gelungen zu bezeichnen. Schlussakzent setzen eine kritische Würdigung des Erreichten und ein Ausblick auf weitere Forschungsfragen.

Insgesamt ist die Dissertation von Herrn Dr. Lass eine Pionierarbeit im Bereich der Schaffung eines integrativen Fabrikbetriebssystems für cyber-physische Systeme und Industrie 4.0. Unter Anwendung wissenschaftlich anerkannter Methoden gelingt es dem Autoren, eine Konzeption für einen hybriden Simulator abzuleiten, zu implementieren und zu validieren. Damit hat er eine sehr eindrucksvolle wissenschaftliche Leistung erbracht.

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Gronau*

# Vorwort

Cyber-physischer Systeme und das Internet of Things (IoT) in der Fabrik sind mit Industrie 4.0 ein prägender Bestandteil in der Diskussion um die zukünftige Ausgestaltung und Durchführung von Produktionsprozessen. Allerdings sind dezentrale Ansätze und Technologien keine Errungenschaft der aktuellen Zeit. Als Lösungsparadigmen existierten sie in unterschiedlichen technologischen Ausprägungen und Realisierungsformen seit jeher. Regelmäßig wiederkehrend finden sie Eingang in das Portfolio zur Bewältigung aktueller Problemstellungen. Auch Produktion und Logistik bilden dahingehend keine Ausnahme. Als ich vor einigen Jahren begann, die Fabrik als Diskursbereich meiner wissenschaftlichen Tätigkeit zu erschließen, waren u. a. die Adaption bioanaloger Ansätze, Schwarmintelligenz und SelfX-Prinzipien sowie Multiagentensysteme mögliche Lösungsoptionen. Schnell reifte die Erkenntnis, dass eine vielversprechende Lösungsidee für die zunehmende technologische als auch organisatorische Komplexität in der Nutzung dezentraler Ansätze bestand, d. h. die Applikation eines dezentralen Produktionsmanagements mit autonomen Objekten. Dessen Vorteile gegenüber monolithischen Zentralsystemen schienen eine geeignete Antwort auf die Herausforderung produzierender Unternehmen zu sein.

Denn der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit verlangt moderne Produktionssysteme, die einerseits durch eine hohe Produktivität bei geringen Kosten und andererseits durch große Flexibilität bezüglich der Variantenvielfalt gekennzeichnet sind, um auf Kundenwünsche eingehen bzw. auf die Dynamik des Marktes reagieren zu können. Insbesondere durch die Globalisierung wandeln sich die Märkte zu Käufermärkten mit teilweise disruptivem Charakter. Wandlungsfähigkeit als die selbstständige, aktive Anpassung an wechselnde Bedingungen und Bedarfe wird zu einem wesentlichen Wettbewerbsfaktor für produzierende Unternehmen. Dies führt zu einer hohen Komplexität des Produktionsmanagements, welche es durch geeignete Technologien und Organisationskonzepte zu beherrschen gilt. Dezentralität und Autonomie – mittels

---

cyber-physischer Systeme (CPS) realisiert – sind als grundlegende Lösungsansätze mit diesbezüglichem Potenzial anerkannt, wie aktuelle Diskussionen zeigen.

Auch die Politik erkannte, dass industrielles Internet über einen Browser am Arbeitsplatz hinausgeht. Das neue Motto hieß seitdem Industrie 4.0 und ward fortan als einer der neuen technologischen Heilsbringer für den Wirtschaftsstandort Deutschland propagiert. Auch werden die zahlreichen Arbeitskreise nicht müde, die Rolle des Menschen in der schönen neuen Welt zu betonen. Mit Blick auf die verpuffte CIM-Welle der 90er Jahre ersetzt MTI, die enge Kooperation von Mensch und Technik, die Vision der menschenleeren, vollautomatisierten Fabrik. MTI ist neben CPS sicher eines der vielgenutzten Begriffe innerhalb des I4.0-Diskurses und zeigt das neben der Technik und Organisation die psychosoziale Komponente in hohem Maße in die Betrachtungen einzubeziehen ist.

Inzwischen gibt es buchstäblich tausende Publikationen, deren Autoren cyber-physische Systeme als wesentlichen Problemlösungsbaustein innerhalb produzierender Unternehmen proklamieren. Konsens besteht hinsichtlich bestehender Herausforderungen, die typischerweise den einleitenden Part bilden: Globalisierung, demographischer Wandel, die Nachfrage nach hochgradig kundenindividuellen Produkten und die damit einhergehende Planungs- und Steuerungskomplexität. Die anschließend vorgestellten Ideen, Konzepte, Ordnungsprinzipien, Systematiken, Vorgehensbeschreibungen etc. verstehen sich größtenteils als nutzbare Lösungsbausteine, deren Verwendung produzierenden Unternehmen gestattet, die genannten Herausforderungen zu meistern. Dieses Portfolio erfährt Ergänzung durch Technologien und Implementierungen, die zumindest aus Perspektive der Anbieter bereits als fertiges Produkt verfügbar sind. Mit Blick auf die tatsächliche Nutzung in der Praxis scheinen die potenziellen Anwender diesen Optimismus nicht vollständig zu teilen: der Einsatz der neuen Problemlöser erfolgt nur zögerlich.

Die Gründe sind sicherlich vielschichtig und umfassen mehrere Perspektiven. Beispielsweise scheitert die einfache Umsetzung an der Spezifik der jeweils vorliegenden Situation. Die Transformation der theoretischen Anwendungspotenziale und die Adaption der Lösungsbausteine innerhalb des existierenden Produktionssystems ist zwingend erforderlich. Ähnlich einer gut gefüllten Werkzeugbox gilt es die passenden Instrumente auszuwählen, geeignet zu konfigurieren und zu kombinieren, um zielgerichtet die gestellte Aufgabe meistern zu können. Da die Realisierung von Industrie 4.0 im Unternehmen in den meisten Fällen eher im Brown-Field Szena-

---

rio geschieht, verhindert das Fehlen von Migrationsstrategien eine systematische und zielgerichtete Fortentwicklung. Ebenfalls beeinträchtigen falsche Erwartungen und Fehleinschätzungen bei Verantwortlichen und Entscheidern die erfolgreiche Umsetzung.

Anders formuliert, eine erfolgreiche Umsetzung erfordert die individuelle Adaption der allgemeinen Lösungskonzepte auf die spezifischen Gegebenheiten innerhalb der Fabriken oder Fertigungsanlagen unter Berücksichtigung des Dreiklangs Mensch, Technik und Organisation. Infolgedessen bleibt insbesondere bei Klein- und Mittelständischen Unternehmen (KMU) die Nutzung bzw. die Umsetzung hinter den Erwartungen zurück. Vor allem die Ermittlung des spezifischen Potenzials und die Bestimmung des konkreten Nutzens für das Unternehmen sind Hindernisse, die eine Implementierung cyber-physischer Produktionssysteme (CPPS) erschwert.

Dieses Buch widmet sich dieser Problemstellung und stellt ein Werkzeug zur Lösung vor. Grundlegender Ansatz ist die Simulation von Produktionssystemen, welcher hinsichtlich der Erfordernisse der spezifischen und dennoch aufwandsarmen Modellierung Erweiterungen erfährt. Neben der Erkenntnis, in wie weit sich diese gegenüberstehenden Anforderungen vereinen lassen, entwirft das Buch in Form einer hybriden Simulationsumgebung mit sowohl physischen als auch virtuellen Komponenten ein entsprechendes Konzept und beschreibt dessen Implementierung. Ergebnisartefakt ist ein Werkzeug, welches mit der realitätsnahen Simulation individueller Anwendungsfälle die überzeugende Demonstration und aussagekräftige Validierung des spezifischen Nutzens von CPS in der Fabrik gestattet. Die entstandene Anlage ist im Anwendungszentrum Industrie 4.0 Potsdam verfügbar.

*Dr.-Ing. Sander Lass*

---



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	2
1.2	Problemstellung . . . . .	6
1.3	Ziel und Einordnung . . . . .	9
1.3.1	Forschungsfragen . . . . .	11
1.3.2	Wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	13
1.4	Forschungsdesign und Aufbau der Arbeit . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Grundlegende Betrachtung des Diskursbereichs</b>	<b>19</b>
2.1	Unternehmen und Produktionssystem . . . . .	19
2.1.1	Produktionssysteme . . . . .	20
2.1.2	Produktionssystem als Subsystem des Unternehmens . . . . .	23
2.1.3	Produktionsnetze und Wertschöpfungsketten . . . . .	27
2.1.4	Leistungsbewertung von Produktionssystemen . . . . .	30
2.2	Informationssysteme in der Fabrik . . . . .	33
2.2.1	Automatisierungspyramide . . . . .	34
2.2.2	Besonderheiten des Automatisierungsbereichs . . . . .	38
2.2.3	Dezentralität und Autonomie . . . . .	43
2.2.4	Industrie 4.0 als Anwendungsdomäne von CPS . . . . .	49
2.3	CPS und CPPS . . . . .	53
2.3.1	Begriffsbestimmung . . . . .	53
2.3.2	Potenziale im Fabrikkontext . . . . .	56
2.3.3	Anwendungsbeispiel Smarte Sensoren . . . . .	58
2.4	Fabriksimulation . . . . .	63
2.4.1	System und Modell . . . . .	65
2.4.2	Simulation . . . . .	68

2.4.3	Grundlegende Ansätze der Fabriksimulation . . . . .	72
2.5	Zusammenfassung . . . . .	77
<b>3</b>	<b>Anforderungen</b>	<b>83</b>
3.1	Grundlegende Anforderungsanalyse . . . . .	83
3.1.1	Charakteristika des Anwendungskontextes . . . . .	84
3.1.2	Basisanforderungen . . . . .	86
3.1.3	Auswahl des Simulationsansatzes . . . . .	88
3.2	Analyse bestehender Ausprägungen . . . . .	92
3.2.1	Informationserhebung . . . . .	92
3.2.2	Kriterienset . . . . .	93
3.2.3	Auswahl existierender Ansätze . . . . .	97
3.3	Schlußfolgerungen . . . . .	107
3.4	Anforderungskatalog . . . . .	110
3.4.1	Validierbarkeit des Einsatzes von CPS . . . . .	110
3.4.2	Breites Anwendungsspektrum . . . . .	111
3.4.3	Aufwandsarme Modellierung . . . . .	113
3.4.4	Einbeziehung aller relevanten Stakeholder . . . . .	114
3.4.5	Technische Anforderungen . . . . .	116
3.5	Zusammenfassung . . . . .	118
<b>4</b>	<b>Konzeption einer Forschungsplattform</b>	<b>121</b>
4.1	Vorgehen der Konzepterstellung . . . . .	121
4.1.1	Systemziel und Systemidee . . . . .	122
4.1.2	Abstraktionsstufen und Modellierungshierarchie . . . . .	123
4.1.3	Methodik des Entwicklungsprozesses . . . . .	125
4.2	Anwendersicht . . . . .	128
4.2.1	Anwendungspotenziale . . . . .	128
4.2.2	Akteurs- und Rollenmodell . . . . .	133
4.2.3	Nutzerperspektiven . . . . .	135
4.3	Architektursicht und Systemdesign . . . . .	139
4.3.1	Hybrides Simulationsprinzip . . . . .	140
4.3.2	Fabrikbetriebssystem . . . . .	143
4.3.3	Produktionsobjekte . . . . .	148
4.3.4	Materialfluss und Logistik . . . . .	150

4.3.5	Informationsfluss . . . . .	151
4.3.6	CPS-Befähigung vorhandener Industrieobjekte . . . . .	153
4.4	Systemelemente . . . . .	154
4.4.1	Cubes . . . . .	155
4.4.2	Transportsystem . . . . .	156
4.4.3	Puffer und Läger . . . . .	157
4.4.4	Betriebliche Anwendungssysteme . . . . .	158
4.4.5	Weitere Elemente . . . . .	162
4.5	Modellierung . . . . .	163
4.5.1	Vorgehensmodell . . . . .	164
4.5.2	Datenaufnahme . . . . .	165
4.5.3	Wiederverwendung von Komponenten . . . . .	168
4.6	Zusammenfassung . . . . .	169
<b>5</b>	<b>Prototypische Implementierung</b>	<b>173</b>
5.1	Vorbetrachtung und Intention . . . . .	174
5.2	Architektursicht . . . . .	176
5.2.1	Grundlegende Auswahlentscheidungen . . . . .	176
5.2.2	Systemarchitektur . . . . .	179
5.2.3	Datenhaltung . . . . .	180
5.2.4	Anbindung betrieblicher Anwendungssysteme . . . . .	183
5.2.5	Anbindung von Industrieobjekten . . . . .	186
5.3	Cubes . . . . .	187
5.3.1	Hardwareentwurf . . . . .	187
5.3.2	Softwareimplementierung . . . . .	189
5.3.3	Komponententest . . . . .	209
5.4	Transportsystem . . . . .	213
5.4.1	Hardwarebereitstellung . . . . .	213
5.4.2	Softwareimplementierung . . . . .	216
5.4.3	Komponententest . . . . .	220
5.5	Zusammenfassung . . . . .	222
<b>6</b>	<b>Validierung des Simulationskonzepts</b>	<b>225</b>
6.1	Begriffsexplikation und Zieldiskussion . . . . .	225
6.2	Anforderungen und resultierendes Vorgehen . . . . .	227

6.3	Testfall Baustahl . . . . .	230
6.3.1	Datenerhebung . . . . .	232
6.3.2	Modellierung . . . . .	239
6.3.3	Simulationsdurchführung . . . . .	243
6.4	Abschließende Diskussion der Validierungsergebnisse . . . . .	251
<b>7</b>	<b>Ergebnisse und Schlussbetrachtung</b>	<b>255</b>
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	255
7.1.1	Forschungslücke . . . . .	257
7.1.2	Simulationskonzept . . . . .	258
7.1.3	Simulationsumgebung . . . . .	260
7.1.4	Beitrag zur Forschung . . . . .	260
7.2	Kritische Würdigung . . . . .	263
7.3	Ausblick . . . . .	264
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>267</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>291</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>295</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>297</b>
	<b>Anhang</b>	<b>299</b>