

# **Methodik zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS)**

Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Maschinenbau

der Ruhr-Universität Bochum

von

Björn Krückhans

aus Essen

Bochum 2016

Dissertation eingereicht am: 17.03.2016

Tag der mündlichen Prüfung: 10.05.2016

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. Horst Meier

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. Egon Müller

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme

Band 2/2016

**Björn Krückhans**

**Methodik zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in  
Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS)**

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4521-5

ISSN 1430-7324

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorveröffentlichungsverzeichnis

---

KRÜCKHANS, B.; KREIMEIER, D.; KUHLENKÖTTER, B. (2015): KOMMUNIKATIONSVERBUND ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ. EINSATZ DER SIMULATIONSTECHNIK IM CPPS. IN: ZWF ZEITSCHRIFT FÜR WIRTSCHAFTLICHEN FABRIKBETRIEB 110 (7-8), S. 421–424.

KRÜCKHANS, B.; WIENBRUCH, T.; FREITH, S.; OBERC, H.; KREIMEIER, D.; KUHLENKÖTTER, B. (2015): Learning Factories and their Enhancements - A Comprehensive Training Concept to Increase Resource Efficiency. In: *Procedia CIRP* 32, S. 47–52. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.224.

KRÜCKHANS, B.; KREIMEIER, D.; WIENBRUCH, T. (2015): Knowledge transfer of achievements from research projects in Learning Projects. In: Vera Hummel (Hg.): *The Learning Factory. An annual edition from the network of innovative learning factories*, ISBN: 9783981750805.

KRÜCKHANS, B. ; BAKIR, D. ; MEIER, H.: Einsatz der Simulationstechnik in der prozesstechnischen Industrie zur Reduktion des Ressourceneinsatzes. In: MÜLLER, E. (Hrsg.): *Produktion und Arbeitswelt 4.0: Aktuelle Konzepte für die Praxis?* Sonderheft 20. Chemnitz: Institut für Print- und Medientechnik (Zentrale Vervielfältigung) der TU Chemnitz, 2014 (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme), S. 279–288

KREIMEIER, D. ; PRINZ, C. ; MORLOCK, F. ; KREGGENFELD, N. ; KRÜCKHANS, B.: Lernfabrik 4.0 - Herausforderungen im Kontext der Industrie 4.0. In: Müller, E. (Hrsg.): *Produktion und Arbeitswelt 4.0: Aktuelle Konzepte für die Praxis?* Sonderheft 20. Chemnitz: Institut für Print- und Medientechnik (Zentrale Vervielfältigung) der TU Chemnitz, 2014 (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme), S. 515–524

KRÜCKHANS, B. ; MEIER, H. ; BAKIR, D.: Benefit of Integrated Agent-based Simulation in Smart Factories to Reduce Resource Consumption of Interlinked Production Lines. In: CHEN, F. Frank (Hrsg.): *Proceedings of the 24th International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing: Capturing competitive advantage via advanced manufacturing and enterprise transformation: May 20-23, 2014, San Antonio, Texas, USA, 2014*

BAKIR, D. ; KRÜCKHANS, B. ; FREITH, Sebastian ; KREIMEIER, Dieter: Learning Factories as Enablers of a Smart Production. In: CHEN, F. Frank (Hrsg.): *Proceedings of the 24th International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing: Capturing competitive advantage via advanced manufacturing and enterprise transformation: May 20-23, 2014, San Antonio, Texas, USA, 2014*

BAKIR, D. ; MEIER, H. ; KRÜCKHANS, B.: Economic and Ecologic Assessment within Small and Medium-sized Enterprises to increase Industrial Resource Efficiency. In: CHEN, F. Frank (Hrsg.): *Proceedings of the 24th International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing: Capturing competitive advantage via advanced manufacturing and enterprise transformation: May 20-23, 2014, San Antonio, Texas, USA, 2014*

KREIMEIER, D. ; MORLOCK, F. ; PRINZ, C. ; KRÜCKHANS, B.; BAKIR, D.; MEIER, H.: *Holistic Learning Factories – A Concept to Train Lean Management, Resource Efficiency as Well as Management and Organization Improvement Skills*. In: *Procedia CIRP* 17 (2014), S. 184–188

KRÜCKHANS, B. ; MEIER, H.: Industrie 4.0 – Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion. In: DANGELMAIER, W.; LAROQUE, C.; KLAAS, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2013: [Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung ; 15. ASIM Fachtagung]* ; Paderborn, 09. - 11. Oktober 2013. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst. Univ. Paderborn, 2013 (147), S. 31–40

BAKIR, D. ; KRÜCKHANS, B. ; MEIER, H.: *Ressourceneffizienz am Beispiel der Semi-Batch-Fertigung*. In: *Industrie Management* 29 (2013), Nr. 6, S. 17–20

KREIMEIER, D. ; BAKIR, D. ; KRÜCKHANS, B. ; RAINFURTH, C.: Lernfabrik für Ressourceneffizienz: Praxisnahe und -gerechte Bildung im Kontext der Ressourceneffizienz. In: GRONAU, N. (Hrsg.): *Productivity Management 4/2013: Nachhaltige Produktion*. 1., Auflage. Berlin: Gito, 2013, S. 47–50

MEIER, H. ; BAKIR, D. ; KRÜCKHANS, B.: Practical Approach to Analyze and Optimize Energy Efficiency within a Press Hardening Process. In: *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems*. Cham: Springer International Publishing AG, 2013 (Lecture Notes in Mechanical Engineering), S. 1613–1626

MEIER, H. ; BAKIR, D. ; KRÜCKHANS, B.: *Resource efficiency within semi-continuous production: an approach to assess process-inherent resource dissipation*. In: *Management and Production Engineering Review* 4 (2013), Nr. 4

MEIER, H. ; KHALAF, S. ; KRÜCKHANS, B.: *Simulationsprozess für energieeffiziente Produktion*. In: *IT & Production* (2012), Nr. 2, S. 80–83

MEIER, H. ; KRÜCKHANS, B.: Innovatives technisches Assistenzsystem zur Optimierung der Arbeitsgestaltung. In: MÜLLER, E. (Hrsg.): *Demographischer Wandel: Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation der Zukunft*. Berlin: GITO-Verl., 2012 (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB)).

MEIER, H. ; KHALAF, S. ; KRÜCKHANS, B.: *Mit Materialflusssimulation zu effizienteren Prozessen*. In: *Productivity Management* 16 (2011), Nr. 1

## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS) der Ruhr-Universität Bochum und wurde von der dortigen Fakultät für Maschinenbau als Dissertation angenommen. Es ist nun an der Zeit, dass ich mich bei all jenen Menschen bedanke, die mich fachlich und insbesondere menschlich in den vergangenen Jahren unterstützt und auf diese Weise maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Meier für die wissenschaftliche Anleitung und Förderung meiner Arbeit herzlich danken. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Egon Müller für die spannenden Dialoge und die unkomplizierte Übernahme des Koreferats.

Meine Zeit und die Gemeinschaft am LPS werde ich immer in sehr guter Erinnerung behalten. Dies verdanke ich im Besonderen der sehr persönlichen und hilfsbereiten Umgangsweise von Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Kreimeier, sowie meinen Kolleginnen und Kollegen in den Arbeitsgruppen. Es hat mir sehr viel Freunde gemacht, mit solchen Menschen täglich zusammenarbeiten zu dürfen.

Besonders hervorheben möchte ich meinen Doktorbruder und langjährigen Freund Dr.-Ing. Stefan Schröder, mit dem ich einen Großteil meines Lebensweges gemeinsam gestalten durfte. Es war und ist weiterhin eine wundervolle und großartige Zeit. Für die uneingeschränkte Unterstützung, Förderung und gute Zusammenarbeit danke ich ausdrücklich Herrn Dr.-Ing. Sebastian Khalaf. Ein besonderes Dankeschön gilt ebenfalls Niklas Kreggenfeld M. Sc., Dr.-Ing. Friedrich Morlock und Christopher Prinz M. Sc. für die gemeinsamen Jahre, die Kollegialität und insbesondere die Freundschaft!

Meiner Familie und ganz besonders meiner Mutter Ruth Krückhans danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen in mich und die kontinuierliche Förderung. Nur durch ihre harte Arbeit wurde mir mein Lebensweg ermöglicht. Ein ganz besonderes Dankeschön gilt auch meinem Schwiegervater, Wilfried Kurzenacker, der unermüdlich und mit größter Sorgfalt diese Arbeit Korrektur gelesen hat.

Nicht zuletzt danke ich meiner wundervollen Frau Anna, die immer an mich geglaubt und mir durch ihre geduldige und moralische Unterstützung den nötigen Rückhalt für das Erstellen dieser Arbeit gegeben hat.

Alles, was ich tat und tun werde ist für dich, meine kleine Tochter – **Sarah Maria**



## Kurzfassung

---

Aufgrund der dynamischen Marktsituation, volatiler Rohstoffverfügbarkeit und starker Preisschwankungen für Industrierohstoffe an den Beschaffungsmärkten wird das Umfeld für produzierende Unternehmen immer komplexer und der wirtschaftliche Betrieb von unterschiedlich ausgeprägten Wertschöpfungsketten deutlich schwieriger. Um den dynamischen Kundenanforderungen gerecht zu werden, müssen Fabriken kontinuierlich neu geplant und der Betrieb der Produktionsprozesse an die neuen Anforderungen angepasst werden.

Der Aufwand zur Optimierung der Energie- und Ressourceneffizienz ist in der Betriebsphase von Anlagen und Fabriken verhältnismäßig hoch sowie die Möglichkeiten zur Beeinflussung gering. Dadurch wird die Anpassung an ein neues Effizienzniveau mit dem heutigen Stand der Technik häufig unwirtschaftlich.

Daher wurden im Rahmen dieser Dissertation cyber-physische Regelkreise für den Einsatz in cyber-physischen Produktionssystem (CPPS) entwickelt, um durch die Anwendung von Industrie 4.0-Technologien und Simulationswerkzeugen den Änderungsaufwand des Energie- und Ressourceneffizienzniveaus in der Betriebsphase von Anlagen und Fabriken zu reduzieren sowie die Beeinflussbarkeit zu steigern.

Eine übergeordnete Methodik zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in CPPS wurde entwickelt, um die neuartigen Regelkreise strukturiert umsetzen zu können. Die Methodik basiert auf vier aufeinander aufbauenden Teillösungen. Teillösung 1 liefert einen Beitrag zur Smartisierung von physischen Systemeinheiten und virtuellen Datenpunkten hin zu Industrie 4.0-Komponenten. Sie bildet somit die Basis, um eine Industrie 4.0-taugliche Infrastruktur aufzubauen und organisieren zu können. In Teillösung 2 wird die Bildung und Integration einer Smart-Data-Wissensbasis beschrieben, die es durch die Aggregation von Prozesswerten ermöglicht simulationskonforme Verbrauchsprofile automatisiert zu bestimmen. In Teillösung 3 wird der strukturierte Aufbau von kaskadierten automatisierten cyber-physischen Reglern beschrieben, welche die notwendigen Stellgrößen zur Optimierung der betrachteten Regelstrecke bestimmen. Teillösung 4 umfasst Konzepte zur sicheren Freigabe der Stellgrößen durch die virtuelle Erprobung in Emulationsmodellen.

Die Methodik konnte im Rahmen der vorliegenden Dissertation auf Basis von drei Szenarien angewendet und validiert werden. Innerhalb des Forschungsverbundprojektes „rebas“ erfolgte eine systematische Untersuchung der Methodik im industriellen Umfeld, die die Praxistauglichkeit des Ansatzes belegt.

Schlagwörter: Industrie 4.0, Ressourceneffizienz, Simulation



## Abstract

---

Today's dynamic markets, the sparse availability of resources and strong price oscillations for industrial resources on the procurement markets are constantly challenging manufacturing companies as their business environment is becoming more and more complex and the economic operation of various value-added chains more difficult. To meet the dynamic customer needs, it has become necessary to constantly re-design factories and to adapt the operation of production processes to the new requirements.

To optimize the energy and resource efficiency within the operating phase of plants and factories, the effort and expenses needed are huge and the options to influence these optimization procedures are little. Therefore, it is rather inefficient and uneconomical to adapt the currently available technology to a new efficiency level.

This PhD thesis introduces cyber-physical control loop systems for their use in cyber-physical production systems (CPPS) in order to reduce the modification effort of the energy and resource efficiency level within the operating phase of plants and factories and to increase the possibilities to influence this modification process.

The present work has developed a superordinated methodology to increase the resource efficiency in CPPS in order to ensure a well-structured implementation of these innovative control loops. The methodology is based on four successive partial solutions. Solution 1 contributes to the smartization of physical system units and virtual data points as well as Industry 4.0 components. It serves as a basis to establish and organize an Industry 4.0-compliant infrastructure. Solution 2 describes the establishment and integration of a smart data knowledge base which makes it possible to determine simulation-compliant consumption profiles. This profile determination is realized through an automated process that relies on the aggregation of process values. Solution 3 illustrates the structured installation of cascaded and automated cyber-physical control units which determine the necessary variables to optimize the considered control path. Solution 4 considers concepts for a secure release of the variables by their virtual proving in emulation models.

Within the scope of this dissertation it has been possible to apply and validate the methodology on the basis of three scenarios. The methodology and its industrial application has been systematically investigated as part of the network project "rebas". The approach presented has been found highly promising and suitable for application.

Keywords: Industry 4.0, Resource Efficiency, Simulation



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung und Lösungsansatz .....	5
1.3	Aufbau der Arbeit.....	7
<b>2</b>	<b>Terminologie und Eingrenzung der Untersuchung</b> .....	<b>10</b>
2.1	Energie- und Ressourcenumsatz in der Fabrik .....	10
2.1.1	<i>Planung und Betrieb von Fabriken</i> .....	10
2.1.2	<i>Energie- &amp; Ressourceneffizienz</i> .....	14
2.1.3	<i>Gestaltungsfelder der Fabrik</i> .....	16
2.1.4	<i>Beschreibungsmodelle für Fabriken</i> .....	20
2.2	Digitale Fabrik.....	23
2.2.1	<i>Entwicklung und Begriffsdefinition</i> .....	23
2.2.2	<i>Simulation in der Digitalen Fabrik</i> .....	27
2.2.3	<i>Unterstützung der Inbetriebnahme durch Simulation</i> .....	28
2.3	Industrielle Revolution .....	30
2.3.1	<i>Entwicklung der industriellen Produktion</i> .....	30
2.3.2	<i>Grundlegende Begriffe in der Industrie 4.0</i> .....	34
2.3.3	<i>Internet der Dinge und Dienste</i> .....	37
2.3.4	<i>Technologieparadigma</i> .....	39
2.3.5	<i>Internationaler Vergleich</i> .....	39
2.4	Ableitung der Forschungsfragen .....	40
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Technik</b> .....	<b>42</b>
3.1	Ansätze zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in Produktionssystemen durch Simulation.....	42
3.2	Ansätze zur Kopplung virtueller und realer Fabrikelemente.....	57
3.3	Analyse von Forschungsprojekten.....	61
3.4	Zwischenfazit zum Stand der Forschung und Technik.....	62
<b>4</b>	<b>Handlungsbedarf</b> .....	<b>63</b>
4.1	Herausforderungen.....	63
4.2	Anforderungen an die Methodik.....	64
4.3	Einordnung bestehender Konzepte .....	69
<b>5</b>	<b>Konzeption der Methodik und strukturelle Umsetzung</b> .....	<b>71</b>
5.1	Regelkreis im CPPS zur Erhöhung der Ressourceneffizienz.....	72
5.2	Zwischenfazit .....	77
<b>6</b>	<b>Entwicklung der Teillösungen</b> .....	<b>79</b>
6.1	Teillösung 1: Smartisierung von Systemeinheiten .....	79

6.1.1	<i>Beschreibung der Methode zur Smartisierung von Systemeinheiten</i>	79
6.1.2	<i>Implementierung der Werkzeuge und Modelle</i>	81
6.2	Teillösung 2: Smart-Data-Wissensbasis	87
6.2.1	<i>Beschreibung der Methode zum Aufbau der Wissensbasis</i>	88
6.2.2	<i>Implementierung der Werkzeuge und Modelle</i>	89
6.3	Teillösung 3: Kaskadierte cyber-physische Regelung	97
6.3.1	<i>Beschreibung der Methode zum Betrieb einer CP-Regelung</i>	98
6.3.2	<i>Implementierung der Werkzeuge und Modelle</i>	100
6.4	Teillösung 4: Virtuelle Erprobung zur Freigabe neuer Stellgrößen	102
6.4.1	<i>Beschreibung der Methode zur virtuellen Erprobung und Freigabe neuer Stellgrößen</i>	103
6.4.2	<i>Implementierung der Werkzeuge und Modelle</i>	105
6.5	Zwischenfazit	108
<b>7</b>	<b>Validierung der Gesamtmethodik</b>	<b>110</b>
7.1	Szenario 1: Demonstrator	110
7.1.1	<i>Ausgangssituation und Ausprägung der Methodik</i>	111
7.1.2	<i>Umsetzung der virtuellen Erprobung zur Freigabe neuer Stellgrößen</i>	112
7.1.3	<i>Zwischenfazit</i>	114
7.2	Szenario 2: Industrielle Anwendung	114
7.2.1	<i>Ausgangssituation</i>	114
7.2.2	<i>Zielsetzung des industriellen Verbundprojektes</i>	116
7.2.3	<i>Ausprägung der Methodik zur Umsetzung des CP-Regelkreis</i>	116
7.2.4	<i>Umsetzung der Teillösungen</i>	117
7.2.5	<i>Übersicht der Optimierungen</i>	132
7.2.6	<i>Zwischenfazit</i>	134
7.3	Szenario 3: Pilotfabrik	134
7.3.1	<i>Ausgangssituation und Ausprägung der Methodik</i>	134
7.3.2	<i>Umsetzung der Smartisierung und Aufbau der Wissensbasis</i>	135
7.3.3	<i>Zwischenfazit</i>	138
7.4	Diskussion der Ergebnisse	139
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>140</b>
8.1	Zusammenfassung	140
8.2	Ausblick	142
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>143</b>
A.1	Einordnung von I40-Technologien	143
A.2	Visual Basic Quellcode zur Anforderung einer Datenberechnung in Origin	143
A.3	Origin LabTalk Skript zum Abruf der Daten aus einer Datenbank und Berechnung der Simulationsparameter (Smart Data)	144
A.4	Quellcode zur Ressourcenzuweisung in Enterprise Dynamics	145
A.5	Quellcode im EntryTrigger der Atome zur Abbildung des Regelverhaltens in Enterprise Dynamics	147

A.6 Quellcode zur Berechnung der Kennzahlen in Enterprise Dynamics .....	149
A.7 Quellcode zur Berechnung der Gesamt-Linien-Effizient (OEE) .....	150
A.8 Umsetzung der Methodik in der LPS Lernfabrik.....	151
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....</b>	<b>153</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>155</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>180</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>185</b>