

# **Verfahrensentwicklung zur Bewertung und Beherrschung komplexitätsinduzierter Effizienzverluste**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
der Universität Bayreuth  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Diplom-Wirtschaftsingenieur Univ. Andreas Kruse  
  
aus  
Nürnberg

|                             |                                                                              |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Erstgutachter:              | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper                                        |
| Zweitgutachter:             | Univ.-Prof. Prof. eh. Dr.-Ing. Dr. h.c.<br>Dipl.-Wirtsch.-Ing. Wilfried Sihn |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 08.12.2015                                                                   |

Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik  
Universität Bayreuth  
2016



# **Fortschritte in Konstruktion und Produktion**

herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg und  
Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Band 34

**Andreas Kruse**

## **Verfahrensentwicklung zur Bewertung und Beherr- schung komplexitätsinduzierter Effizienzverluste**

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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2015

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 978-3-8440-4353-2

ISSN 1612-2364

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)

## Geleitwort der Herausgeber

Das erfolgreiche Industrieunternehmen von heute ist ein aktives Element der global zunehmend vernetzten Welt.

Mit hohem Innovationstempo steigern neue Märkte und Technologien die Arbeitsanforderungen, vergrößern neue Werkstoffe und Verfahren, die Informationstechnik und ein Wertewandel der Kundenwünsche aber auch die Gestaltung- und Entfaltungsmöglichkeiten des Ingenieurs.

Die Konstruktion ist die Königsdisziplin des Ingenieurs. Die Produktion ist die technische Dienstleistung am König Kunde. Beide Aufgabenfelder zusammengekommen bilden den Kern des industriellen Wertschöpfungsprozesses.

Mit der hier vorgelegten Reihe "Fortschritte in Konstruktion und Produktion" ist es den Herausgebern ein Anliegen, Beiträge von wissenschaftlicher Seite zu fördern, die durch Entwicklung neuer Denkansätze, methodischer Vorgehensweisen und zugehöriger Instrumente die Leistungsfähigkeit der industriellen Wertschöpfung verbessern und erweitern. Nicht nur technische Lösungen, sondern auch ökonomische, ökologische und soziale Fortschritte stehen hierbei im Blickpunkt oder zumindest am Horizont.

Hierfür bietet die Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften mit ihrer interdisziplinären Ausrichtung und Einbindung in die Universität Bayreuth ein glückliches Umfeld.

Das Engagement der beiden Herausgeber ist dort vertreten als

- Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
- Lehrstuhl für Umweltgerechte Produktionstechnik.

Mögen also die von uns betreuten Dissertationen, die in dieser Buchreihe erscheinen, zu den wünschenswerten Fortschritten in Konstruktion und Produktion beitragen.

Den Autoren der einzelnen Bände dieser Reihe sei für Ihre wissenschaftliche und redaktionelle Arbeit gedankt, den Lesern wünschen wir eine interessante Lektüre und hoffentlich manch wertvolle Anregung für eine erfolgreiche Anwendung der Forschungsergebnisse in ihrer beruflichen Praxis.

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

## Vorwort

König Kunde benimmt sich nicht immer majestätisch. Zumindest aus der Sicht produzierender Unternehmen, die die zunehmende Flut an Kundenwünschen in immerzu neue Produkte und Produktvarianten umsetzen und diese auch noch flexibel zu marktfähigen Preisen an ihre Kunden liefern müssen, ist dies zunehmend spürbar und stellt viele Unternehmen vor große Herausforderungen.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA sowie als Akademischer Rat auf Zeit am Lehrstuhl für Umweltgerechte Produktionstechnik der Universität Bayreuth. Die zunehmende Relevanz eines richtigen Umgangs mit Komplexität konnte in einer Vielzahl von Projekten mit produzierenden Unternehmen bestätigt werden und führte letztlich auch zur Fokussierung auf das Thema dieser Arbeit. Die Ergebnisse entstanden zu Teilen im Rahmen des Forschungsprojekts KonPrO – Komplexitätsbeherrschung zur nachhaltigen Produktion, das vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie gefördert wurde.

Herrn Prof. Rolf Steinhilper, Ordinarius des Lehrstuhls für Umweltgerechte Produktionstechnik und Leiter der Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation, möchte ich an dieser Stelle aufrichtig für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit sowie die Förderung über die Jahre hinweg danken. Herrn Prof. Wilfried Sihn danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Mein Dank gilt darüber hinaus den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der produzierenden Unternehmen für Anregungen und Impulse in den gemeinsamen Projekten und Workshops sowie für die Ermöglichung der umfassenden industriellen Erprobung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahrens. Ebenso danke ich meinen aktuellen bzw. ehemaligen Kollegen für die gemeinsame Bearbeitung der Industrie- und Forschungsprojekte sowie die anregenden Diskussionen und heiteren Momente. Dies gilt gleichfalls für alle wissenschaftlichen Hilfskräfte und Abschlussarbeiter für ihre Unterstützung.

Zu guter Letzt geht mein Dank an meine Familie, die mich seit jeher unterstützt hat.

Bayreuth, im Dezember 2015

Andreas Kruse

# Inhalt

|                                                                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Motivation.....</b>                                                                                            | <b>1</b>  |
| <b>2 Zielsetzung und Lösungsweg .....</b>                                                                           | <b>6</b>  |
| 2.1 Zielsetzung und Abgrenzung des Betrachtungsraumes .....                                                         | 6         |
| 2.1.1 Zielsetzung der Arbeit.....                                                                                   | 6         |
| 2.1.2 Abgrenzung des Betrachtungsraums.....                                                                         | 7         |
| 2.2 Lösungsweg .....                                                                                                | 9         |
| <b>3 Stand der Erkenntnisse .....</b>                                                                               | <b>11</b> |
| 3.1 Grundlagen und Begriffsbestimmung .....                                                                         | 11        |
| 3.1.1 Produktion und Produktionssystem.....                                                                         | 11        |
| 3.1.2 Komplexität und Komplexitätsmanagement in der Produktion .....                                                | 14        |
| 3.1.3 Zielgrößen einer nachhaltigen Produktion.....                                                                 | 18        |
| 3.1.4 Produktionsplanung und -steuerung sowie Optimierung von Produktionssystemen.....                              | 21        |
| 3.2 Verursachungsgerechte Bewertung von Aufwänden.....                                                              | 23        |
| 3.2.1 Kostenrechnung .....                                                                                          | 23        |
| 3.2.2 Bewertung energetischer Zielgrößen .....                                                                      | 32        |
| 3.2.3 Zwischenfazit zur verursachungsgerechten Bewertung .....                                                      | 37        |
| 3.3 Simulation .....                                                                                                | 38        |
| 3.3.1 Ereignisdiskrete Simulation .....                                                                             | 38        |
| 3.3.2 System Dynamics Ansatz .....                                                                                  | 41        |
| 3.3.3 Agentenbasierte Simulation.....                                                                               | 44        |
| 3.3.4 Zwischenfazit zur Simulation .....                                                                            | 45        |
| 3.4 Beschreibung komplexer Systeme durch Metamodelle.....                                                           | 46        |
| 3.4.1 Statistische Versuchsplanung und polynomiale Metamodelle .....                                                | 47        |
| 3.4.2 Künstliche neuronale Netze .....                                                                              | 50        |
| 3.4.3 Weitere Ansätze zur Erstellung von Metamodellen.....                                                          | 52        |
| 3.4.4 Zwischenfazit zu Metamodellen.....                                                                            | 53        |
| 3.5 Zusammenfassende Bewertung bestehender Ansätze hinsichtlich der Zielsetzung.....                                | 53        |
| <b>4 Konzeption eines Verfahrens zur Bewertung und Beherrschung komplexitätsinduzierter Effizienzverluste .....</b> | <b>55</b> |
| 4.1 Anforderungen an das Verfahren .....                                                                            | 55        |
| 4.2 Gewählter Ansatz und methodisches Vorgehen .....                                                                | 57        |
| 4.2.1 Modellierung des Produktionssystems aus generischen Prozessmodulen.....                                       | 59        |

|                                                                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.2 Verursachungsgerechte Zuordnung von Aufwänden durch betriebszustandsbasierte Ablauflogik .....                                       | 61         |
| 4.2.3 Experimentbasierte Ermittlung des Systemverhaltens .....                                                                             | 66         |
| 4.2.4 Metamodellbasierte Maßnahmenpriorisierung .....                                                                                      | 68         |
| <b>5 Ausarbeitung der Systematik für eine verursachungsgerechte Bewertung.....</b>                                                         | <b>72</b>  |
| 5.1 Datenbasis .....                                                                                                                       | 72         |
| 5.2 Ermittlung der produktionsprogrammspezifischen Outputmengen der Prozessmodule .....                                                    | 74         |
| 5.3 Berechnung der ökonomischen Zielgröße Kosten eines Produktionsprogramms .....                                                          | 77         |
| 5.3.1 Aufbereitung der kostenspezifischen Eingangsdaten.....                                                                               | 80         |
| 5.3.2 Aktivitätenbasierte Zuordnung von Kosten.....                                                                                        | 81         |
| 5.4 Berechnung der ökologischen Zielgröße Energie eines Produktionsprogramms .....                                                         | 92         |
| 5.4.1 Aufbereitung der energiespezifischen Eingangsdaten .....                                                                             | 94         |
| 5.4.2 Aktivitätenbasierte Zuordnung von Energieverbräuchen.....                                                                            | 99         |
| 5.5 Zusammenführung der Systematik für eine verursachungsgerechte Bewertung.....                                                           | 104        |
| <b>6 Simulationsunterstützte Beschreibung des Systemverhaltens bei Änderung<br/>produktionsexterner und -interner Einflussgrößen .....</b> | <b>105</b> |
| 6.1 Integration in eine Simulationsumgebung .....                                                                                          | 105        |
| 6.1.1 Auswahl der Simulationsumgebung und Modellierung von Prozessmodulen.....                                                             | 105        |
| 6.1.2 Umsetzung der entwickelten Bewertungssystematik in der Simulationsumgebung.....                                                      | 108        |
| 6.2 Versuchsplanungs-basierte Ableitung von Metamodellen zur Beschreibung des Systemverhaltens .....                                       | 109        |
| 6.2.1 Auswahl und Erstellung des Versuchsplans .....                                                                                       | 110        |
| 6.2.2 Durchführung der Simulationsexperimente .....                                                                                        | 115        |
| 6.2.3 Ableitung der Metamodelle .....                                                                                                      | 118        |
| 6.2.4 Bewertung und Auswertung der Wirkzusammenhänge sowie Maßnahmenpriorisierung                                                          | 120        |
| 6.3 Überführung der Metamodelle in ein Anwenderwerkzeug .....                                                                              | 123        |
| <b>7 Industrielle Erprobung und Validierung bei einem metallverarbeitenden Unternehmen der<br/>Konsumgüterbranche .....</b>                | <b>125</b> |
| 7.1 Ausgangssituation im Unternehmen.....                                                                                                  | 125        |
| 7.2 Anwendung des entwickelten Vorgehens zur Bewertung und Beherrschung<br>komplexitätsinduzierter Effizienzverluste .....                 | 127        |
| 7.2.1 Datenerfassung und Modellierung des Produktionssystems .....                                                                         | 127        |
| 7.2.2 Definition des Untersuchungsrahmens, Experimentdurchführung und -auswertung .....                                                    | 131        |
| 7.2.3 Maßnahmenpriorisierung und Handlungsempfehlungen.....                                                                                | 139        |
| 7.3 Beurteilung der industriellen Erprobung.....                                                                                           | 141        |

|                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.4 Diskussion des Verfahrens in Hinblick auf die gestellten Anforderungen ..... | 144        |
| <b>8 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                                      | <b>147</b> |
| <b>9 Conclusion and Outlook.....</b>                                             | <b>150</b> |
| <b>10 Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                            | <b>153</b> |
| <b>11 Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>                                     | <b>155</b> |
| <b>12 Abbildungsverzeichnis .....</b>                                            | <b>163</b> |
| <b>13 Tabellenverzeichnis .....</b>                                              | <b>165</b> |
| <b>14 Literaturverzeichnis .....</b>                                             | <b>166</b> |
| <b>15 Anhang .....</b>                                                           | <b>183</b> |
| 15.1 Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie nach VDI Richtlinie 3633 .....   | 183        |
| 15.2 Techniken zur Verifikation und Validierung .....                            | 184        |
| <b>Lebenslauf.....</b>                                                           | <b>186</b> |