

Fortschritte in Konstruktion und Produktion



UNIVERSITÄT
BAYREUTH

Herausgeber: Professor Dr.-Ing. Frank Rieg
Professor Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Christoph J. Velte

**Technik- und
zieldeterminierte industrielle
Produktion in Kreisläufen**

Band 54

Technik- und zieldeterminierte industrielle Produktion in Kreisläufen

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

der Universität Bayreuth

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Wirtschaftsingenieur Christoph Jürgen Velte

aus

Siegen

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Sebastian Schlund

Tag der mündlichen Prüfung: 18.12.2019

Lehrstuhl für Umweltgerechte Produktionstechnik

Universität Bayreuth

2020

Fortschritte in Konstruktion und Produktion

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

Band 54

Christoph J. Velte

**Technik- und zieldeterminierte
industrielle Produktion in Kreisläufen**

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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2019

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 978-3-8440-7199-3

ISSN 1612-2364

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

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

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist das Ergebnis eines langen Prozesses der Entwicklung neuer Ideen, des Austauschs und der gemeinsamen Diskussion in Forschungsprojekten, mit Kollegen und Freunden. An dieser Stelle möchte ich mich bei all meinen Weggefährten auf dieser einzigartigen Reise bedanken.

Zunächst gilt mein Dank meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper, der mit der Inspiration zur Entwicklung dieser Arbeit und der konstruktiven Betreuung bis zu deren Fertigstellung neben dem Weg auch Anfang und Ende maßgeblich prägte. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund für die Übernahme der Rolle des Zweitgutachters und Zweitprüfers. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Döpfer gilt mein Dank für die hilfreichen Hinweise bei der Finalisierung der Arbeit.

Wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung dieser Arbeit hatten meine Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Umweltgerechte Produktionstechnik der Universität Bayreuth sowie bei der Projektgruppe Prozessinnovation des Fraunhofer IPA, bei denen ich mich sehr herzlich für die vielen anregenden Gespräche und die lehrreiche gemeinsame Zeit bedanken möchte. Besonders gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Sebastian Schötz für die intensiven Diskussionen und gemeinsamen Abenteuer auf- und abseits des Weges.

Zu guter Letzt war die fordernde Arbeit an dieser Dissertation nur mit Unterstützung meiner Familie möglich, die mich durch Durststrecken getragen und motiviert hat und es mir erlaubte, dem Projekt die notwendige Zeit einzuräumen. Sie hat mir in unzähligen Stunden den Rücken freigehalten und durch ein offenes Ohr und Rat in Momenten des Zweifelns maßgeblichen Anteil am erfolgreichen Abschluss der Arbeit.

Inhalt

1	Motivation	1
2	Ausgangssituation, Zielsetzung und Lösungsweg	4
2.1	Ausgangssituation.....	4
2.2	Zielsetzung und Abgrenzung.....	5
2.2.1	Zielsetzung.....	5
2.2.2	Eingrenzung des Betrachtungsraums.....	5
2.3	Lösungsweg.....	6
3	Stand der Erkenntnisse	9
3.1	Produktionssysteme und Produktion in Kreisläufen.....	9
3.1.1	Produktion und Produktionssysteme.....	9
3.1.2	Kreislaufwirtschaft.....	14
3.1.3	Graph und Netzwerk.....	20
3.2	Ziel und Zielsystem.....	21
3.2.1	Ziele und Management.....	22
3.2.2	Ziele von Industrieunternehmen.....	22
3.2.3	Zielsysteme.....	28
3.2.4	Zwischenfazit: Ziele einer industriellen Produktion in Kreisläufen.....	30
3.3	Bewertung des Erfolgs von Handlungen.....	36
3.3.1	Definition und Rolle von Kennzahlen.....	36
3.3.2	Kennzahlensysteme.....	38
3.3.3	Nutzung von Kennzahlen und Kennzahlensystemen.....	41
3.3.4	Kennzahlen und Kennzahlensysteme der Nachhaltigkeit.....	42
3.4	Optimierung und Entscheidungsfindung auf Basis von Modellen.....	43
3.4.1	Statische und dynamische Optimierung.....	46
3.4.2	Nutzwertanalyse und analytischer Hierarchieprozess.....	46
3.4.3	Simulation.....	48
3.5	Zusammenfassende Bewertung bestehender Ansätze hinsichtlich der Zielsetzung.....	52
4	Konzeption des Vorgehensmodells	55
4.1	Anforderungen an das Vorgehensmodell.....	55
4.2	Gewählter Ansatz und methodisches Vorgehen.....	57
4.2.1	Lösungsbaustein 1: Ziel- und Kennzahlensystem.....	58
4.2.2	Lösungsbaustein 2: Systemmodellierung.....	59
4.2.3	Lösungsbaustein 3: Simulation und Definition von Handlungsfeldern.....	60

5	Vorgehensmodell für die technik- und zieldeterminierte industrielle Produktion in Kreisläufen	62
5.1	Systematik von Zielen und Entscheidungskontext	62
5.2	Aufbau des Zielsystems der industriellen Produktion in Kreisläufen	65
5.2.1	Mikro-Ebene: Ziele für Produktion und Produkt	67
5.2.2	Meso-Ebene: Ziele des nachhaltigen Unternehmens	69
5.2.3	Makro-Ebene: Ziele der Wertschöpfung in Kreisläufen.....	71
5.2.4	Entwicklung eines Zielsystems.....	72
5.3	Entwicklung eines Vorgehens zur Individualisierung des Zielsystems	79
5.4	Kennzahlen der industriellen Produktion in Kreisläufen	83
5.4.1	Ermittlung und Normierung relevanter Kennzahlen	83
5.4.2	Kennzahlensystem für die industrielle Produktion in Kreisläufen	86
5.5	Prozessmodule der industriellen Produktion in Kreisläufen	89
5.5.1	Systemmodell der industriellen Produktion in Kreisläufen	89
5.5.2	Eingangsgrößen der Prozessmodule.....	91
5.5.3	Eigenschaften der Prozessmodule	96
5.5.4	Ausgangsgrößen der Prozessmodule.....	99
5.5.5	Austauschbeziehungen	101
5.5.6	Prozessmodule der industriellen Produktion in Kreisläufen	102
5.5.7	Gestaltung eines Vorgehens zur Einordnung der Einflussgrößen und Vernetzung der Prozessmodule.....	105
5.6	Bewertung der Systemperformanz.....	107
5.6.1	Statische Bewertung der Systemperformanz	108
5.6.2	Interdependenzen und dynamische Effekte.....	112
5.7	Zwischenfazit.....	117
6	Systemmodellierung und Simulation	120
6.1	Modellierung des Systems	120
6.1.1	Simulationsumgebung und Modellierung der Prozessmodule.....	120
6.1.2	Umsetzung der entwickelten Bewertungssystematik.....	123
6.1.3	Simulation interdependenter Einflussgrößen.....	125
6.2	Extrapolation des Systemverhaltens.....	126
6.2.1	Sensitivitätsanalyse des Systemmodells.....	126
6.2.2	Ableitung der Handlungsfelder	128
7	Zusammenführung zu einem ganzheitlichen Vorgehensmodell	129
8	Industrielle Erprobung des Vorgehensmodells	131
8.1	Ausgangssituation.....	131

8.2	Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells	133
8.2.1	Lösungsbaustein 1: Ziel- und Kennzahlensystem	133
8.2.2	Lösungsbaustein 2: Prozessmodule und Systemkonfiguration	136
8.2.3	Lösungsbaustein 3: Systemmodellierung und Simulationsumgebung	140
8.2.4	Simulationsergebnisse und Implikationen	142
8.3	Beurteilung der industriellen Erprobung	145
8.4	Diskussion des Vorgehensmodells bzgl. der gestellten Anforderungen	147
9	Zusammenfassung	151
10	Ausblick	154
11	Summary	156
12	Outlook	159
13	Abkürzungsverzeichnis	161
14	Formelzeichenverzeichnis	163
15	Abbildungsverzeichnis	166
16	Tabellenverzeichnis	169
17	Literatur- und Quellenverzeichnis	171
18	Bildnachweise	187
19	Anhang	189
19.1	Eingrenzung des Betrachtungsraums	189
19.2	Der Systembegriff	191
19.3	Kennzahlensysteme	191
19.4	Spieltheorie	195
19.5	Vollständige Liste der identifizierten Ziele der Literatur	197
19.6	Quellen der Definitionen von Linear- und Kreislaufwirtschaft	203
19.7	Zielsystem der industriellen Produktion in Kreisläufen	204
19.8	Prozessmodule der industriellen Produktion in Kreisläufen	210
19.9	Werte für die zufällige Inkonsistenz einer Evaluationsmatrix	213
19.10	Quellen für den Katalog an Kennzahlen	213
19.11	Kennzahlen des Zielsystems der industriellen Produktion in Kreisläufen	214
19.12	Interdependenzen der Zielmengen	241
19.13	Individualisiertes Zielsystem der industriellen Erprobung	244
19.14	Simulationsergebnis der industriellen Erprobung	246
19.15	Vergrößerte Darstellung symbolhafter Abbildungen	248
20	Lebenslauf	254