

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Christoph Liebrecht

**Entscheidungsunterstützung für
den Industrie 4.0-Methodeneinsatz**

**Strukturierung, Bewertung und Ableitung
von Implementierungsreihenfolgen**

Band 233



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Christoph Liebrecht

**Entscheidungsunterstützung für den
Industrie 4.0-Methodeneinsatz**
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von
Implementierungsreihenfolgen

Band 233

**Entscheidungsunterstützung für den
Industrie 4.0-Methodeneinsatz**
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von
Implementierungsreihenfolgen

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Christoph Liebrecht
aus Salzgitter

Tag der mündlichen Prüfung: 06.03.2020
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Korreferent: Asst. Prof. Dr.-Ing. Thorsten Wüst

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, 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 978-3-8440-7451-2

ISSN 0724-4967

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

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Betreuung dieser wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin und für das mir entgegengebrachte Vertrauen in den vergangenen Jahren. Außerdem danke ich Herrn Asst. Prof. Dr.-Ing. Thorsten Wüst für sein großes Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Frau Prof. Dr.-Ing. Babara Deml für den Prüfungsvorsitz.

Dem Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS) möchte ich an dieser Stelle für die Förderung meines Forschungsaufenthalts an der West Virginia University (WVU) in Morgantown bei Herrn Asst. Prof. Dr.-Ing. Thorsten Wüst danken.

Allen Kolleginnen und Kollegen am wbk, im Besonderen im Bereich „Produktionssysteme“, danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre am Institut und außerhalb des Arbeitsalltags. Einen besonderen Dank möchte ich an dieser Stelle meinen beiden Kollegen Alexander Jacob und Andreas Kuhnle für die vertrauensvolle Zusammenarbeit während meiner Zeit am wbk und ihr großes Engagement beim Korrekturlesen aussprechen. Mein Dank gilt zudem allen Studierenden, die mit großem Fleiß zum Gelingen meiner wissenschaftlichen Arbeit beigetragen haben. Hervorzuheben sind Matthias Lang, Sebastian Schaumann und Sophie Stahl. Für die offene, wissenschaftliche Diskussion bedanke ich mich besonders bei Herrn Dr. Sven Wachter.

Abschließend möchte ich meinen Eltern und meinem Bruder herzlich für die bedingungslose Unterstützung danken, mit der sie mich stets begleitet haben. Ein besonderer Dank gilt Katharina Kunz, die mit ihrem großen Verständnis entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Karlsruhe, im März 2020

Christoph Liebrecht

Abstract

The digitalization of all areas of life is increasingly finding its way into production and often implies disruptive changes. Shorter product lifecycles increase the pressure on costs and innovation. Customers demand individual products, so companies must increase their flexibility and enable production down to batch size one. As a result of these transformations which are difficult to predict, manufacturing companies find themselves in a more and more dynamic environment. The new approaches and technologies of Industry 4.0 offer opportunities to deal with these dynamics, but at the same time they are accompanied by new challenges.

The economically successful implementation of Industry 4.0 in manufacturing companies requires a structured implementation process. The main objective of such a structured implementation process is the case-specific analysis and evaluation of available Industry 4.0 methods to select the most suitable ones for an individual company.

This thesis presents a methodology for decision support for the implementation of Industry 4.0 methods, which aims to establish a financial, strategic, and benefit-oriented evaluation approach for Industry 4.0 methods to assess their potential. The core of the methodology is a general Industry 4.0 toolbox providing a structured classification of different methods. All Industry 4.0 methods are precisely described and delimited from each other by a method profile.

In the first phase, a limited set of Industry 4.0 methods is derived from the toolbox by classification into production typologies. In the second phase, all Industry 4.0 methods of the derived set are strategically assessed as well as evaluated from a monetary perspective. The evaluation of the methods is based on company-specific characteristics, its strategic focus, and its (market) environment. Based on this evaluation value-adding implementation scenarios are developed. In the third phase, the identified implementation scenarios with their specific order of prioritized methods are simulated in a System Dynamics model.

The three phases ultimately result in a recommendation for a company-specific Industry 4.0 implementation roadmap. All phases of the methodology has been discussed and successfully applied in a production plant of a company from the railway industry as part of the BMBF-funded research project "Intro 4.0".

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungsleitende Fragestellungen	3
1.3 Zielsetzung	4
1.4 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	6
2.1 Digitalisierung und Industrie 4.0 im Kontext von Lean- Manufacturing	6
2.2 Betriebstypologien von Produktionssystemen	10
2.3 Zielgrößen in Produktionssystemen	11
2.4 Grundlagen der Investitions- und Risikobewertung	16
2.4.1 Traditionelle Verfahren der Investitionsrechnung	17
2.4.2 Multikriterielle Bewertungs- und Entscheidungsverfahren	19
2.4.3 Risikobewertung	24
2.5 Ansätze der Ablaufsimulation	28
3 Stand der Forschung	32
3.1 Anforderungen an die Methodik	32
3.2 Reifegradbewertung und Strukturierung von Lean- und Industrie 4.0- Methoden	34
3.3 Analyse von Wirkzusammenhängen in Produktionssystemen	41
3.4 Bewertung von Produktionssystemen	44
3.5 Defizite des aktuellen Stands der Forschung	47
4 Lösungsansatz	52
4.1 Allgemeine Methoden-Toolbox für Industrie 4.0	53

4.1.1	Rahmenmodell und Methoden-Toolbox für Industrie 4.0	54
4.1.2	Ableitung von Wirkzusammenhängen	61
4.2	Phase 1: Eingrenzung relevanter Methoden anhand der Produktionstypologie	68
4.2.1	Entwicklung eines morphologischen Kastens für Produktionstypologien	68
4.2.2	Einordnung der Industrie 4.0-Methoden	71
4.2.3	Vorgehensmodell Phase 1	76
4.3	Phase 2: Bewertung von Potentialmethodensträngen	77
4.3.1	Strategische Bewertung	78
4.3.2	Monetäre Bewertung	83
4.3.3	Rangfolgebildung der Potentialmethodenstränge	88
4.3.4	Vorgehensmodell Phase 2	92
4.4	Phase 3: Simulation von Implementierungsreihenfolgen	94
4.4.1	Definition von allgemeinen und spezifischen Modellierungsparametern	95
4.4.2	Simulationsmodell für Implementierungsreihenfolgen	101
4.4.3	Ableitung von Industrie 4.0-Implementierungsreihenfolgen	108
4.4.4	Vorgehensmodell Phase 3	115
5	Exemplarische Anwendung der Methodik	117
5.1	Phase 1: Eingrenzung relevanter Methoden anhand der Produktionstypologie	118
5.1.1	Betriebstypologische Einordnung	118
5.1.2	Spezifische Potentialmethodenstränge in Abhängigkeit der Produktionstypologie	119
5.2	Phase 2: Bewertung von Potentialmethodensträngen	122
5.2.1	Strategische und monetäre Bewertung	124
5.2.2	Einführungsszenarien mit priorisierten Potentialmethodensträngen	128
5.3	Phase 3: Simulation von Implementierungsreihenfolgen	129
5.3.1	Annahmen für das Simulationsmodell beim Anwendungspartner	129
5.3.2	Empfohlene Industrie 4.0-Roadmap	129
5.4	Prototypische Umsetzung	135

6	Diskussion und Ausblick	138
6.1	Diskussion und kritische Würdigung	138
6.2	Ausblick	141
7	Zusammenfassung	142
	Literaturverzeichnis	144
	Liste eigener Veröffentlichungen	XI
	Abbildungsverzeichnis	XIV
	Tabellenverzeichnis	XVII
	Anhang	XVIII
	Anhang A: Ausprägungen der Anforderungskriterien	XVIII
	Anhang B: Methodensteckbriefe	XIX
	Anhang C: Methodenbeziehungen	XXXV
	Anhang D: Methodennetze – Produktionstypologien	XXXVII
	Anhang E: Kriterienkatalog	XL
	Anhang F: Ablauf Bewertungstool und Simulationsmodell	XLVIII
	Anhang G: Empfohlenes Workshopkonzept	L
	Anhang H: Falldaten Anwendungsfall	LI
	Anhang I: Simulationsergebnisse Anwendungsfall	LIII

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AHP	Analytic Hierarchy Process
APOP	Automatische Planung und Optimierung der Produktion
ATF	Autonome Transportfahrzeuge
AUW	Aus- und Weiterbildung
AV	Auftragsvisualisierung
BCG	Boston Consulting Group
BIF	Bedarfsgerechte Informationen durch Filterung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BVPA	Bedarfsgerechte Versorgung von Produktionsanlagen
CM	Change-Management
CSD	Cyberschutz von gespeicherten Daten bzw. Organisatorische und kommunikative IT-Sicherheit
DDK	Datenaufnahme, Design und Klassifizierung
DFPA	Digitale Ferndiagnose von Produktionsanlagen
DIN	Deutsches Institut für Normung
DITS	Durchgängigkeit von IT-Systemen
DKZM	Digitale Kommunikation zwischen Mitarbeitern
DLDF	Digitale Layoutplanung und Digitales Fabrikmodell
DP	Digitale Produktion
DPEP	Digitalisierung der Personaleinsatzplanung
DSAS	Data Security von Anlagen/ Systemen bzw. Technische IT-Sicherheit
DSDM	Digitale Skillmatrix und Digitale Mitarbeiterzuordnung
DSM	Digitales Shopfloor Management
DVMZ	Digitale Visualisierung von Maschinenzuständen
DWI	Digitale Wartungsinformationen per AR
ECS	Einsatz cyber-physischer Systeme bzw. Ausstatten von Objekten mit Kleinstcomputern

EDAA	Erstellung digitaler Arbeitsanweisungen
EDAI	Erstellung digitaler Anlageninformationen
EDWI	Erstellung digitaler Werkzeuginformationen
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EF	Echtzeitfeedback
EKP	Erarbeiten von Kompetenzprofilen
EPD	Erfassung von Prozessdaten (u. a.) durch Maschinen und Werkzeuge
ESIN	Eindeutige und sichere Identitätsnachweise für Produkte, Prozesse und Maschinen
FDP	Führen durch den Prozess
FF	Forschungsleitende Fragestellung
FLPS	Flexibilisierung von Produktionssystemen bzw. Plug & Produce
GPS	Ganzheitliches Produktionssystem
HKP	Homogenisierung von Kommunikationsprotokollen
IAEP	Integrierter Änderungsprozess
IAUD	Intelligente Anlagenüberwachung und -diagnose
IB	Intelligente Behälter
IDE	Intelligente Datenerhebung
IFM	Institut für Mittelstandsforschung
IIG	Implementierungsintensitätsgradient
IKMM	Intelligente Kommunikation zwischen Maschinen und Mitarbeitern
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IP	Intelligente Palette
IPA	Integration bestehender Produktionsanlagen
IPEP	Intelligente Personaleinsatzplanung
IPSL	Intelligente Produktionssteuerung und Lagerhaltung
IrN	Index relativer Nähe
IRV	Intelligente Routen durch Vernetzung
ISTP	Intelligente standortübergreifende Transportprozesse

IW	Intelligente Werkstücke
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KW	Kapitalwert
KWM	Kapitalwertmethode
LPS	Lean Production System
LTR	Lokalisierung und Tracking von Ressourcen
LWA	Live-Wertstromanalyse
MADM	Multi Attribute Decision Making
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MODM	Multi Objective Decision Making
NWA	Nutzwertanalyse
OID	Objektidentifikation
PDMA	Produktionsdaten per mobiler App
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PF	Papierlose Fertigung
PM	Predictive Maintenance
QS	Qualitätssicherung
RFID	Radio-frequency identification
SKFP	Selbstkonfigurierung von Produktionsanlagen
SKRP	Selbstkorrektur von Produktionsanlagen
SOP	Selbstorganisierte Produktion
SVP	Simulation mit virtuellen Prototypen/ Prozessen
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities und Threats
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TRG	Technologischer Reifegrad
UG	Umsetzungsgrad
UK	Unterstützungskoeffizient
VAP	Virtuelles Abbild der Produktion

VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDPD	Verfügbarkeit digitaler Produktionsdaten
VED	Verfügbarkeit von Echtzeitdaten
VIPA	Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen/ Werkzeugen
VPQS	Visuelle In-Process-QS
ZG	Zielgröße
ZKN	Zukunftsfähige Kommunikationsnetzwerke
ZRL	Zentrale Rechenleistung
ZVD	Zentrale Verfügbarkeit bzw. Verwaltung von Daten

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung
α	Lageparameter α
a	Intervallgrenze und unterer Schätzwert a
a_{tria}	Minimalwert a_{tria}
a_t	Auszahlungen zum Zeitpunkt t
A	Paarvergleichsmatrix $A = (a_{ij})$
A_i	Alternative A_i (mit $i = 1, \dots, n$)
A^+	theoretisch optimale/ beste Lösung A^+
A^-	theoretisch schlechteste Lösung A^-
β	Lageparameter β
b	Intervallgrenze und oberer Schätzwert b
b_{tria}	Maximalwert b_{tria}
$B(\alpha, \beta)$	Eulersche Beta-Funktion mit Lageparameter α und β
C_{i^+}	Index der relativen Nähe C_{i^+}
d_{ij}	Ausprägungen d_{ij} aller Kriterien K_j (mit $j = 1, \dots, m$)
D	Entscheidungsmatrix
e_t	Einzahlungen zum Zeitpunkt t
σ	Standardabweichung σ
$f_X(x)_{beta}$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für beta-verteilte Zufallsvariable X
$f_X(x)_{norm}$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für eine normalverteilte Zufallsvariable X
$f_X(x)_{tria}$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für eine dreiecksverteilte Zufallsvariable X
i	Laufvariable i
j	Laufvariable j
k	Laufvariable k
k_i	Kriterien k_i
k_{nk}	Kriterien k_{nk} der Zielgröße n und Kriterium k

K_j	Kriterien K_j (mit $j = 1, \dots, m$)
$K \times K$	$K \times K$ -Matrix der Elemente K
KW	Kapitalwert
m	Laufvariable m
m_w	wahrscheinlichster Wert m_w
m_M	Methode m_M
M	Anzahl untersuchter Methoden M
μ	Erwartungswert μ
n	Laufvariable n und Zielgröße n
N_i	Gesamtnutzenwert N der Alternative i
r	Kalkulationszinssatz
r_i	geometrische Mittelwerte r_i
r_{ij}	Elemente r_{ij} der normalisierten Entscheidungsmatrix R
R	Entscheidungsmatrix R
S_{i+}	euklidischer Abstand S_{i+}
S_{i-}	euklidischer Abstand S_{i-}
t	Zeitindex t
t_{Basis}	Basisdauer t_{Basis}
t_{dyn}	dynamische Implementierungszeit t_{dyn}
t_{ik}	Teilnutzenwert der Alternative i und des Kriteriums k
t_{max}	maximale Abschätzung der Implementierungsdauer t_{max}
t_{min}	minimale Abschätzung der Implementierungsdauer t_{min}
T	letzter Zeitpunkt T , an dem Zahlungen anfallen
T_{nk}	Kriterienausprägungen T_{nk} der Zielgröße n und des Kriteriums k
UG	Umsetzungsgrad UG
v_j^+	theoretisch beste Lösung v_j^+
v_j^-	theoretisch schlechteste Lösung v_j^-
V	Nutzwert V

$V_{nk;m_M}$	Teilnutzenwert V_{nk} des Kriteriums k_{nk} der Methode m_M
w	Gewichtungsfaktor w
w_k	Gewichtungsfaktor w des Kriteriums k
w_{nk}	Kriteriengewichtung w_{nk}
X	Zufallsvariable X
ZG_i	Zielgrößenwert ZG_i
