



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

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Formelverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungsleitende Fragestellungen	3
1.3 Zielsetzung	4
1.4 Aufbau der Arbeit	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
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
<b>3 Stand der Forschung</b>	<b>32</b>
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
<b>4 Lösungsansatz</b>	<b>52</b>
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
<b>5</b>	<b>Exemplarische Anwendung der Methodik</b>	<b>117</b>
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

---

<b>6</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>138</b>
6.1	Diskussion und kritische Würdigung	138
6.2	Ausblick	141
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>142</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>144</b>
	<b>Liste eigener Veröffentlichungen</b>	<b>XI</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XIV</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XVII</b>
	<b>Anhang</b>	<b>XVIII</b>
	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
$\alpha$	Lageparameter $\alpha$
$a$	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 $A^-$
$\beta$	Lageparameter $\beta$
$b$	Intervallgrenze und oberer Schätzwert $b$
$b_{tria}$	Maximalwert $b_{tria}$
$B(\alpha, \beta)$	Eulersche Beta-Funktion mit Lageparameter $\alpha$ und $\beta$
$C_{i^+}$	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 $t$
$\sigma$	Standardabweichung $\sigma$
$f_X(x)_{beta}$	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 $M$
$\mu$	Erwartungswert $\mu$
$n$	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 $ZG_i$

---

# 1 Einleitung

Deutschland ist eine der weltweit führenden Industrienationen und besitzt mit einem Anteil des produzierenden Gewerbes von 25,8 % am Bruttoinlandsprodukt im internationalen Vergleich einen starken industriellen Sektor (Statistisches Bundesamt 2019). Innerhalb der industriellen Schlüsselbereiche sind u. a. die Automobilindustrie sowie der Maschinen- und Anlagenbau von hoher Bedeutung. Die Unternehmen dieser Branchen konnten sich bisher auf ihren im internationalen Vergleich technologischen Vorsprung und die hohe Qualität ihrer Produkte verlassen. Dieser Vorsprung wird in Zukunft geringer werden, da Wettbewerber aus Schwellenländern sich an den technologischen Stand in Deutschland annähern und unter kostengünstigeren Bedingungen produzieren. (BMW 2019)

Hinzu kommen weitere Herausforderungen, die durch Megatrends der Gesellschaft bedingt sind. Verkürzte Produktlebenszyklen erhöhen den Kosten- und Innovationsdruck weiter. Kunden fordern individuelle Produkte, sodass Unternehmen ihre Flexibilität steigern und eine Produktion bis hin zur Losgröße eins ermöglichen müssen. Zudem hält die zunehmende Digitalisierung aller Lebensbereiche vermehrt Einzug in die Produktion und bringt häufig disruptive Veränderungen mit sich. (Bischoff & Taphorn et al. 2015; IfM Bonn 2014; Ganschar & Gerlach et al. 2013)

## 1.1 Motivation

Durch diese schwer zu prognostizierenden Veränderungen finden sich produzierende Unternehmen in einem immer dynamischeren Marktumfeld wieder. Parallel dazu entstehen neue Konzepte zur schnellen Reaktion auf Marktbedingungen, die mit neuen Anforderungen durch die Ansätze und Technologien der Industrie 4.0 einhergehen. (Lanza & Nyhuis et al. 2018)

Der Begriff „Industrie 4.0“ wurde erstmals auf der Hannover Messe 2011 öffentlich vorgestellt. Laut frühen Studien (siehe Abbildung 1-1) können produzierende Unternehmen in Deutschland mit Produktivitätssteigerungen von 30 % durch den Einsatz von Industrie 4.0 bis zum Jahr 2025 rechnen (Bauer & Schlund et al. 2014). Es wird alleine in Deutschland von einem volkswirtschaftlichen Potential durch Industrie 4.0 von 20-30 Milliarden Euro ausgegangen (Wischmann & Wangler et al. 2015). Die Managementberatung Bain beziffert den weltweiten Umsatz alleine mit Industrie 4.0-Lösungen im Jahr 2020 auf 85 Milliarden US-Dollar (Bowen & Goel et al. 2017). Allerdings haben

41 % aller kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) in Deutschland noch keine Industrie 4.0-Projekte realisiert (Deloitte 2019). Außerdem haben 32 % der Unternehmen keine explizite Strategie zur Einführung von Industrie 4.0 (Berg 2017). Dies liegt zum einen an hohen Investitionskosten und zum anderen an Unklarheiten bezüglich der Vision und des Nutzens sowie an Verständnislücken (McKinsey & Company 2016). Eine repräsentative Umfrage des Digitalverbandes Bitkom mit 505 Unternehmen ab 20 Mitarbeitern zum Stand der Digitalisierung der deutschen Wirtschaft kommt zu dem Ergebnis, dass jedes vierte Unternehmen seine Existenz durch die Digitalisierung gefährdet sieht und 60 % sich bei der Digitalisierung als Nachzügler einordnen (Berg 2017). Die Zahl der Unternehmen, die sich mit Industrie 4.0 beschäftigen, steigt zwar signifikant, jedoch ist der operative Einsatz von Industrie 4.0 noch immer verschwindend gering und eine strukturierte Einführung dieser bis heute nicht gegeben (Staufen AG 2018). So werden zwar Technologien, die für die Umsetzung von Industrie 4.0 notwendig sind, eine erhebliche Bedeutung eingeräumt (Beispiele hierfür sind die Technologien „Big Data“ (69 %), „Internet of Things“ (66 %) und „Virtual & Augmented Reality“ (52 %)), diese werden jedoch nur in wenigen Unternehmen eingesetzt, geplant oder diskutiert (Berg 2017).

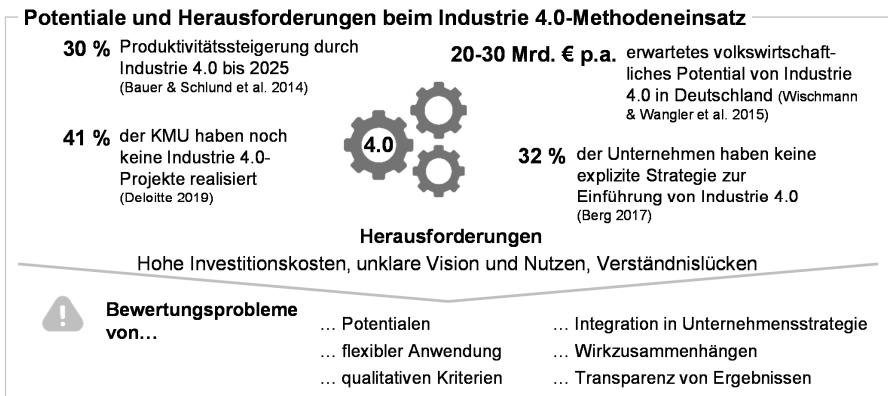


Abbildung 1-1: Industrie 4.0 – Potentiale und Herausforderungen

Anhand dieser Zahlen wird deutlich, dass die Bedeutung von Industrie 4.0 erkannt wird, die dafür notwendigen „Industrie 4.0-Methoden“ jedoch nur in wenigen Unternehmen tatsächlich umgesetzt werden. Eine **Industrie 4.0-Methode** beschreibt dabei das plan-

mäßige, systematische und durch Hilfsmittel unterstützte Vorgehen zur Erreichung eines Industrie 4.0-spezifischen Ziels durch den Einsatz von Industrie 4.0-Technologien (Liebrecht & Schaumann et al. 2018).

Ein Grund hierfür ist, dass Unternehmen bei der Einführung von Industrie 4.0 vor erheblichen Herausforderungen stehen (Dombrowski & Richter et al. 2015). Einerseits gibt es Bewertungsprobleme der Potentiale von Industrie 4.0. Dabei ist es vor allem schwierig, qualitative Kriterien einzubeziehen, das Vorgehen in die Unternehmensstrategie zu integrieren und die Ergebnisse transparent darzustellen. Dafür müssen u. a. Wirkzusammenhänge zwischen einzelnen Methoden definiert werden. Andererseits stellt die Langfristigkeit der Investitionen in Industrie 4.0-Methoden (z. T. > 5 Jahre) ein weiteres Problem dar, da sie eine realistische finanzielle Bewertung erschwert. Außerdem sind finanzielle Auswirkungen in einem dynamischen und komplexen Umfeld kaum prognostizierbar.

## **1.2 Forschungsleitende Fragestellungen**

Die in der Motivation aufgezeigten Herausforderungen führen zu den folgenden forschungsleitenden Fragestellungen (FF), welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit beantwortet werden sollen:

- Wie können Industrie 4.0-Methoden funktional strukturiert und eingegrenzt werden? (FF 1)
- Welche Wirkzusammenhänge können zwischen Industrie 4.0-Methoden bestehen? (FF 2)
- Wie kann ein Bewertungsansatz ausgestaltet werden, sodass sowohl der finanzielle als auch der strategische Nutzen berücksichtigt wird? (FF 3)
- Wie können allgemeingültige und unternehmensspezifische Implementierungsreihenfolgen von Industrie 4.0-Methoden abgeleitet werden? (FF 4)

Diese forschungsleitenden Fragestellungen strukturieren die vorliegende Arbeit und bilden die Grundlage für eine Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeinsatz einer Produktion.

### 1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz einer Produktion. Die Methodik ermöglicht es, auf Grundlage einer zu entwickelnden allgemeinen Methoden-Toolbox für Industrie 4.0 eine nutzen- und aufwandsbasierte Bewertung von Industrie 4.0-Methoden durchzuführen sowie darauf aufbauend relevante Implementierungsreihenfolgen abzuleiten.

Produzierenden Unternehmen sollen durch die Methodik konkrete Handlungsempfehlungen in Form von allgemeinen und unternehmensspezifischen Industrie 4.0-Methoden aufgezeigt werden. Dazu wird eine Industrie 4.0-Methoden-Toolbox auf Basis von Expertenwissen aufbereitet. Außerdem muss die Methodik fähig sein, die Wirkzusammenhänge von Industrie 4.0-Methoden zu analysieren und darzustellen. Um die Industrie 4.0-Methoden praktisch nutzbar zu machen, wird die Methoden-Toolbox deshalb über eine definierte Kombinatorik mit einem Bewertungs- und Simulationsansatz verknüpft. Die Digitalisierung der Produktion eines produzierenden Unternehmens erfordert die Eingrenzung des Betrachtungsraums, der aus einer großen Anzahl an Handlungsalternativen besteht. Entsprechend wird die Methodik eine Vorauswahl von potentiell in Frage kommenden Methoden anhand von Produktionstypologien vornehmen. Die so eingegrenzten Methoden werden innerhalb der Methodik hinsichtlich strategischer und monetärer Potentiale bewertet. Darauf aufbauend wird die Methodik als Ergebnis Implementierungsreihenfolgen von Industrie 4.0-Methoden mittels einer System Dynamics Simulation über einen langfristigen Zeitraum ableiten. Mit den Ergebnissen dieses Modells und der Strukturierung der Industrie 4.0-Methoden wird eine Auswahl an empfohlenen Implementierungsreihenfolgen getroffen.

### 1.4 Aufbau der Arbeit

Zur Erreichung der beschriebenen Zielsetzung ist die vorliegende Arbeit in sieben Kapiteln gegliedert, deren Aufbau in Abbildung 1-2 dargestellt ist. In Kapitel 2 und Kapitel 3 werden die Grundlagen und aktuellen Arbeiten zum Stand der Forschung beschrieben und bestehende Defizite dargestellt. Daraus leitet sich die in Kapitel 4 vorgestellte Methodik ab. Dazu wird zunächst eine allgemeine Methoden-Toolbox für Industrie 4.0 mittels Literaturrecherchen und Experteninterviews erstellt, welche den Betrachtungsraum der vorliegenden Arbeit bildet. Die folgenden drei Phasen „Eingrenzung anhand der Produktionstypologie“, „Bewertung von Potentialmethodensträngen“ und „Simulation



von Implementierungsreihenfolgen“ beschreiben das Vorgehen bei der Anwendung der Methodik zur Entscheidungsunterstützung für produzierende Unternehmen bezüglich der Einführung von Industrie 4.0 in der Produktion. Die exemplarische Anwendung der Methodik ist in Kapitel 5 anhand eines Beispiels aus der industriellen Praxis beschrieben. Daraufhin wird die Methodik in Kapitel 6 kritisch diskutiert und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsaktivitäten gegeben. Kapitel 7 fasst abschließend die vorliegende Arbeit zusammen.

<b>Aufbau der Arbeit</b>	
<b>Kapitel 1</b>	<b>Einleitung</b>
<b>Kapitel 2</b>	<b>Grundlagen</b>
<b>Kapitel 3</b>	<b>Stand der Forschung</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ansätze mit Fokus Reifegradbewertung und Strukturierung von Methoden</li><li>▪ Ansätze mit Fokus Analyse von Wirkzusammenhängen</li><li>▪ Ansätze mit Fokus auf Bewertung von Produktionssystemen</li><li>▪ Anforderungen an die Methodik und Defizite des Stands der Forschung</li></ul>
<b>Kapitel 4</b>	<b>Lösungsansatz</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Allgemeine Methoden-Toolbox für Industrie 4.0</li><li>▪ Phase 1: Eingrenzung anhand der Produktionstypologie</li><li>▪ Phase 2: Bewertung von Potentialmethodensträngen</li><li>▪ Phase 3: Simulation von Implementierungsreihenfolgen</li></ul>
<b>Kapitel 5</b>	<b>Exemplarische Anwendung der Methodik</b>
<b>Kapitel 6</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>
<b>Kapitel 7</b>	<b>Zusammenfassung</b>

Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit und Strukturierung der Kapitel

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die relevanten Grundlagen der Themengebiete erläutert, die zur Beantwortung der Fragestellungen dieser Arbeit beitragen. In Kapitel 2.1 wird das Thema Digitalisierung und Industrie 4.0 im Kontext von Lean-Manufacturing eingeordnet. In Kapitel 2.2 erfolgt die Definition des betriebstypologischen Begriffs. Um Produktionssysteme in Hinblick auf Industrie 4.0 zu bewerten, werden in Kapitel 2.3 relevante Zielgrößen vorgestellt. Kapitel 2.4 stellt Grundlagen der Investitions- und Risikobewertung vor. Im Anschluss daran wird in Kapitel 2.5 ein Überblick über die Ansätze der Ablaufsimulation gegeben.

### 2.1 Digitalisierung und Industrie 4.0 im Kontext von Lean-Manufacturing

„Die Digitalisierung steht für die umfassende Vernetzung aller Bereiche von Wirtschaft und Gesellschaft sowie die Fähigkeit, relevante Informationen zu sammeln, zu analysieren und in Handlungen umzusetzen“ (BMW 2015). Diese Definition ist ähnlich zu Definitionen in anderen Quellen. Zum Beispiel definieren Bloching & Leutiger et al. (2015) die digitale Transformation als die „durchgängige Vernetzung aller Wirtschaftsbereiche und als Anpassung der Akteure an die neuen Gegebenheiten der digitalen Ökonomie.“ Die Begriffe Digitalisierung und digitale Transformation werden im Folgenden synonym verwendet.

Der Begriff Industrie 4.0 wird nicht einheitlich verwendet und definiert. Viele Quellen fassen Industrie 4.0 als digitale Transformation des produzierenden Gewerbes auf (Roth 2016). Für diese Arbeit soll die Definition gemäß der Plattform Industrie 4.0 verwendet werden. Nach dieser steht der Begriff Industrie 4.0 „für die vierte industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette“, und soll einen Bezug zu den bisherigen vergangenen drei industriellen Revolutionen herstellen (Plattform Industrie 4.0 2015). Im englischsprachigen Raum wird statt Industrie 4.0 häufig der Begriff „Smart Production“ oder auch „Smart Manufacturing“ verwendet, um die vollständig vernetzte Produktion durch Aspekte des Internets der Dinge zu beschreiben (Geßner 2015).

Werden die Definitionen der Digitalisierung und der Industrie 4.0 verglichen, ist zu erkennen, dass die Digitalisierung einen umfassenderen Bereich betrachtet und sich mit allen Bereichen der Wirtschaft beschäftigt. Der Begriff Industrie 4.0 ist hingegen enger

gefasst und beschäftigt sich mit der digitalen Transformation der Industrie bzw. des produzierenden Gewerbes. Wenn von Industrie 4.0 gesprochen wird, liegt der Fokus meist auf der Produktion. Folglich wird Industrie 4.0 als Teilbereich der Digitalisierung verstanden.

In der Vergangenheit wurden in vielen Unternehmen Produktionssysteme eingeführt, die auf Lean-Prinzipien basieren (Dombrowski & Richter et al. 2017). Die Lean-Prinzipien bzw. die entsprechende Umsetzung in der Produktion, das Lean-Manufacturing, basiert dabei auf der Überlegung, dass Verschwendung identifiziert und beseitigt werden muss (Abdulmalek & Rajgopal 2007). Die sieben Arten der Verschwendung im Lean-Manufacturing sind dabei nach Ohno (1988): Überproduktion, Wartezeiten, Transport, der Prozess selbst (zu aufwändig bzw. zu komplex), Bestände, Bewegung und defekte Teile bzw. Ausschuss. Im deutschsprachigen Raum ist Lean-Manufacturing auch unter dem Begriff „schlanke Produktion“ bekannt. Mit der Veröffentlichung der VDI 2870 (VDI 2870 Blatt 1 2012; VDI 2870 Blatt 2 2013) hat sich der Begriff der „Ganzheitlichen Produktionssysteme“ (GPS) durchgesetzt, der nun als Synonym für Lean-Manufacturing zum Industriestandard geworden ist.

Ein GPS beschreibt die Möglichkeit, schlanke, effiziente und zielorientierte Prozesse über das gesamte Unternehmen hinweg zu realisieren. Ein GPS weist dabei drei wesentliche Merkmale auf: Die Ausrichtung aller Prozesse am Kunden sowie die Vermeidung von Verschwendung neben kontinuierlicher Verbesserung, der Einsatz eines methodischen Regelwerks zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens und die kontinuierliche Entwicklung der Mitarbeiter. (Dombrowski & Richter 2016)

Auch im Rahmen von Industrie 4.0 sind diese Prinzipien relevant, sodass sich die Frage stellt, in welchem Zusammenhang Industrie 4.0 und Lean-Manufacturing stehen. Zur Analyse der verschiedenen Bewertungsansätze der Zusammenhänge zwischen Industrie 4.0 und Lean-Manufacturing wird in Mayr & Weigelt et al. (2018) von den folgenden drei existierenden Perspektiven gesprochen, nach denen sich die Literatur zu diesem Thema einordnen lässt: Lean-Manufacturing ermöglicht Industrie 4.0, Industrie 4.0 treibt Lean-Manufacturing voran und es existiert eine positive Korrelation zwischen Industrie 4.0 und Lean-Manufacturing. Ähnliche Perspektiven werden auch von Buer & Strandhagen et al. (2018) und Bittencourt & Saldanha et al. (2019) beschrieben.

Nachdem in der Vergangenheit viele Unternehmen Lean-Manufacturing eingeführt haben, liegt es nahe, Lean-Manufacturing auch als Basis für weitere Entwicklungen in

Produktionssystemen zu sehen. Dies würde Lean-Manufacturing auch zur Grundlage bzw. Voraussetzung für die Einführung und Entwicklung von Industrie 4.0 machen. Metternich & Müller et al. (2017) sehen in der Verankerung der Lean-Denkweise im Unternehmen eine notwendige Voraussetzung für die Einführung von Industrie 4.0. Rüttimann & Stöckli (2016) gehen sogar so weit, dass Industrie 4.0 im Kontext von grundsätzlichen Regeln der Produktion stehen muss und sie Produktionsverantwortlichen empfehlen, die Transformation im Sinne des Lean-Manufacturing durchzuführen. Auch empirisch kann gezeigt werden, dass Lean-Manufacturing die Basis für Industrie 4.0 ist. Rossini & Costa et al. (2019) schließen aus ihrer empirischen Untersuchung, dass Unternehmen, die höhere Reifegrade der Industrie 4.0 erreichen wollen, zuvor Ansätze des Lean-Manufacturing umgesetzt haben müssen. Außerdem vertreten mehrere Quellen die Ansicht, dass Industrie 4.0 Lean-Manufacturing weiter vorantreibt und hilft, die damit verbundenen Ziele zu erreichen. Mrugalska & Wyrwicka (2017) beschreiben zum Beispiel anhand von Use Cases, wie Industrie 4.0 genutzt werden kann, um Lean-Manufacturing umzusetzen. Beispielsweise stellen Dombrowski & Richter (2018) Methoden vor, die eine Verknüpfung von Industrie 4.0 und Lean-Manufacturing darstellen. Dabei bauen die Autoren auf einer vorherigen Veröffentlichung auf, in welcher sie beschreiben, dass Lean-Manufacturing die Basis für Industrie 4.0 ist (Dombrowski & Richter et al. 2017). Mayr & Weigelt et al. (2018) kommen nach einer umfangreichen Literaturrecherche zu dem Schluss, dass es unterstützende Effekte in beiden Richtungen gibt und sich Industrie 4.0 und Lean-Manufacturing gegenseitig ergänzen.

Insgesamt zeigt sich, dass Industrie 4.0 und Lean-Manufacturing eng miteinander verbunden sind. Beide Philosophien verfolgen ähnliche Ziele, wobei nicht alle Lean-Ansätze mit denen der Industrie 4.0 vereinbar sind (Metternich & Müller et al. 2017). Sind Prozesse in einem Unternehmen bereits entsprechend dem Lean-Manufacturing umgesetzt, ist es einfacher, diese Prozesse mit Lösungen der Industrie 4.0 weiterzuentwickeln. Gleichzeitig fördert Industrie 4.0 durch gleiche Zielsetzungen die Weiterentwicklung von Lean-Manufacturing und hilft Unternehmen, in diesem Bereich eine höhere Entwicklungsstufe zu erreichen. Das Lean-Manufacturing lässt sich daher als ein gutes Fundament für die Einführung von Industrie 4.0 betrachten und keineswegs als ein Hindernis. Zusammen können beide Paradigmen erhebliche Effizienz- und Prozessverbesserungen erreichen.

Die Forschung im Bereich Industrie 4.0 ist noch verhältnismäßig jung, weshalb in der Literatur für eine Vielzahl an Begriffen unterschiedliche, teilweise divergierende Definitionen existieren (Roth 2016). Aufgrund dessen werden im Anschluss Begriffe, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendig sind, definiert.

### Industrie 4.0-Methode

Eine Industrie 4.0-Methode beschreibt das planmäßige, systematische und durch Hilfsmittel unterstützte Vorgehen zur Erreichung eines Industrie 4.0-spezifischen Ziels durch den Einsatz von Industrie 4.0-Technologien (siehe Abbildung 2-1) (Liebrecht & Schaumann et al. 2018).

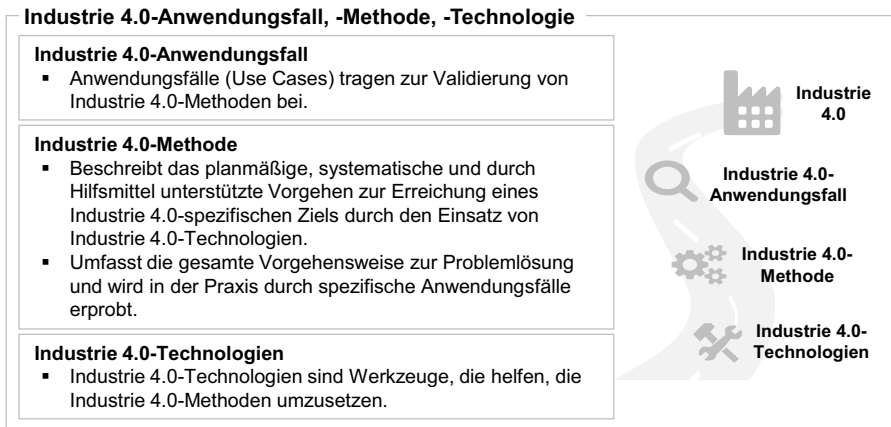


Abbildung 2-1: Abgrenzung Industrie 4.0

Eine Methode umfasst damit die gesamte Vorgehensweise zur Problemlösung und wird in der Praxis in Anwendungsfällen umgesetzt. Industrie 4.0-Technologien sind Werkzeuge, die helfen, eine Industrie 4.0-Methode praktisch umzusetzen. Die vorliegende Arbeit legt den Fokus auf Industrie 4.0-Methoden im Umfeld der Produktion.

Es wird zwischen Grundlagenmethoden und Potentialmethoden unterschieden. Methoden aus der unteren Ebene des Rahmenmodells (siehe Kapitel 4.1.1) schaffen die notwendigen Grundlagen, um Industrie 4.0 in einem Unternehmen erfolgreich einzuführen und haben überwiegend keine Auswirkungen auf Zielgrößen. Potentialmethoden bauen auf dem Gerüst der Grundlagenmethoden auf und versprechen große Auswirkungen auf Zielgrößen.

### **Methodensteckbrief**

Jede Industrie 4.0-Methode kann detailliert auf einem Methodensteckbrief zusammengefasst werden. Dieser dient der verständlicheren Visualisierung und damit besseren Diskussionsgrundlage für die Anwendung bei Industriepartnern. Beispiele von Steckbriefen können VDI 2870 Blatt 2 (2013) und Greitemann (2016) entnommen werden.

## **2.2 Betriebstypologien von Produktionssystemen**

Die Typologie ist eine wirtschaftswissenschaftliche Methode, die eine Vielzahl realer Erscheinungsformen strukturiert und überschaubar anhand von Merkmalen und Merkmalsausprägungen darstellt (Aleff 1999; Schomburg 1980). Die Typologie wird im Rahmen dieser Arbeit als theoretische und abstrahierte Strukturierung von Produktionen verstanden. Die Morphologie ist als die reale Form einer Produktion zu verstehen. (Aleff 1999)

Zur Ableitung der Betriebstypologien von Produktionssystemen eignet sich die Kreativitätstechnik des morphologischen Kastens. Dabei handelt es um ein Vorgehen, bei dem im Allgemeinen ein Problem in seine Bestandteile und dessen Ausprägungsmöglichkeiten zerlegt wird (Schawel & Billing 2014).

Schomburg (1980) entscheidet sich für die Methode der Typologie, um eine große Anzahl an Ausprägungsformen wiederzugeben, ohne dabei die Nutzbarkeit seines Modells zu beeinträchtigen. Es werden Erfahrungen aus Praxisanwendungen berücksichtigt, um Merkmalsausprägungen zu identifizieren. Durch die Übertragung der Morphologie einer realen Produktion können somit betriebstypenbezogene Anforderungsprofile abgeleitet werden. Schomburg (1980) identifiziert acht Merkmale, mit denen betriebstypologische Grundmuster abgeleitet werden: Erzeugnisspektrum, Erzeugnisstruktur, Auftragsauslösungsart, Dispositionsart, Beschaffungsart, Fertigungsart, Fertigungsablaufart und Fertigungsstruktur.

Schuh & Stich (2012) strukturieren die betriebsinternen Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung bezüglich der Prozesssicht in die vier idealtypischen Auftragsabwicklungstypen Auftragsfertiger, Rahmenauftragsfertiger, Variantenfertiger und Lagerfertiger. Für diese Typen wird eine betriebstypologische Analyse durchgeführt und die Merkmalsausprägungen werden unter einer Struktur zusammengefasst.

Sowohl Schomburg (1980) als auch Schuh & Stich (2012) nutzen das betriebstypologische Modell für die Ermittlung von Anforderungen und die Gliederung von Aufgaben.

Ergänzend dazu verwendet Peter (2009) ein anderes Vorgehen, um verschiedene Ausprägungen einer Kleinserienfertigung abzubilden und die Eignung von Lean-Methoden in Abhängigkeit der Merkmalsausprägung zu ermitteln. Dieser Ansatz ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

**Exemplarischer morphologischer Kasten**

Merkmalsausprägung	Richtwert	Methode 1	Methode 2	Methode 3
Ausprägung 1	Richtwert 1	●	○	◐
Ausprägung 2	Richtwert 2	◐	●	●
Ausprägung 3	Richtwert 3	○	◐	◐

Geeignet  
  Bedingt geeignet  
  Ungeeignet

*Abbildung 2-2: Darstellung der Eignung von Methoden in Abhängigkeit der Ausprägungsstufen (in Anlehnung an (Peter 2009))*

Lean-Methoden weisen im Allgemeinen eine inhaltliche Nähe zu Industrie 4.0-Methoden auf (siehe Kapitel 2.1). Aus diesem Grund lassen sich die Vorgehensweisen von Schomburg (1980), Schuh & Stich (2012) und Peter (2009) insgesamt auf Industrie 4.0-Methoden übertragen.

### 2.3 Zielgrößen in Produktionssystemen

Verbesserungsaktivitäten in Produktionssystemen sollen grundsätzlich einen Beitrag zur Erreichung der Unternehmensziele leisten (Dombrowski & Krenkel et al. 2018). Hierzu ist ein Verständnis der Zusammenhänge zwischen Unternehmenszielen und Entscheidungen auf operativer Ebene für Methoden bzw. Handlungsempfehlungen notwendig (Michaeli 2017). Um Auswirkungen der Implementierung von Industrie 4.0-Methoden in der Produktion erfassen zu können, werden unterschiedliche Zielgrößen betrachtet und definiert. Dafür werden die benötigten Begriffe erst eingeordnet und anschließend die fünf verwendeten Zielgrößen vorgestellt.

Gladen (2014) definiert Kennzahlen im weiteren Sinne als „quantitative Informationen, die für die spezifischen Bedürfnisse der Unternehmensanalyse und -steuerung aufbereitet worden sind.“ Im engeren Sinne werden sie als „Maßgrößen, die willentlich stark verdichtet werden zu absoluten oder relativen Zahlen“ bezeichnet (Gladen 2014). Kennzahlen stellen somit ein geeignetes Mittel dar, um Daten in geeigneter Weise zu aggregieren und zur Planung, Steuerung oder Kontrolle einzusetzen (Meyer 2011). Nach Gottmann (2016) besitzen Kennzahlen unterschiedliche Funktionen. Sie können als Führungsinstrument zur Koordination und Steuerung, für die Produktionsstrategie

als Benchmark zur Entscheidungsfindung, oder als Messinstrumente zur Dokumentation und Kontrolle eingesetzt werden. Die betrachteten Ziele, bewertet durch Kennzahlen, werden als Zielgröße bezeichnet (Gladen 2014).

Die betrachteten Zielgrößen im Kontext der Produktion werden dem „magischen Dreieck“ entnommen, welches die Zielkonkurrenz von Kosten, Zeit und Qualität darstellt (Gottmann 2016). Häufig wird die Annahme getroffen, dass Zielgrößen aufgrund ihrer Beziehungen zueinander nicht gleichzeitig verbessert werden können. Die Reduzierung der Produktionszeit würde beispielsweise einen Anstieg der Kosten aufgrund zusätzlich getätigter Investitionen bedeuten. Es gibt aber auch Meinungen, die der Grundannahme des magischen Dreiecks entgegenstehen und davon ausgehen, dass bei einer Anpassung eines Prozesses durchaus die Möglichkeit der Steigerung aller drei Größen gegeben ist (Becker 2018). Bei diesen drei Zielgrößen handelt es sich um die zentralen Wettbewerbsfaktoren eines Unternehmens, die heute üblicherweise um die Zielgröße Flexibilität erweitert werden (Merl 2016). Außerdem sollte das Zielsystem um die Zielgröße Mitarbeiter erweitert werden. Insbesondere in mittelständischen Unternehmen übernehmen einzelne Mitarbeiter häufig mehrere Aufgaben und sind dabei die alleinigen Wissensträger (Bergmann & Crespo 2009). Für die Produktion bedeutet dies, dass die Beschäftigten vielfältig einsetzbar sind, jedoch auch umfassende Fachkenntnisse und Kompetenzen benötigen (Bischoff & Taphorn et al. 2015). Beschäftigte lassen sich also nicht einfach durch einen neuen oder anderen Mitarbeiter ersetzen (Bergmann & Crespo 2009). Beim ungeplanten Ausscheiden einzelner Mitarbeiter aus dem Unternehmen können Know-how-Verluste entstehen, die die Arbeitsfähigkeit des Unternehmens gefährden (Bergmann & Crespo 2009). Kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) sind dabei Unternehmen mit einem Jahresumsatz  $\leq 50$  Millionen Euro und einer Beschäftigtenzahl  $< 500$  Mitarbeiter (IfM Bonn 2016). Speziell KMU stehen vor der Herausforderung, Anreize und Voraussetzungen zu schaffen, welche die Mitarbeiter motivieren und befähigen, sich langfristig an ein Unternehmen zu binden. In Abbildung 2-3 werden die genannten Zielgrößen, die im Folgenden detailliert erläutert werden, dargestellt.



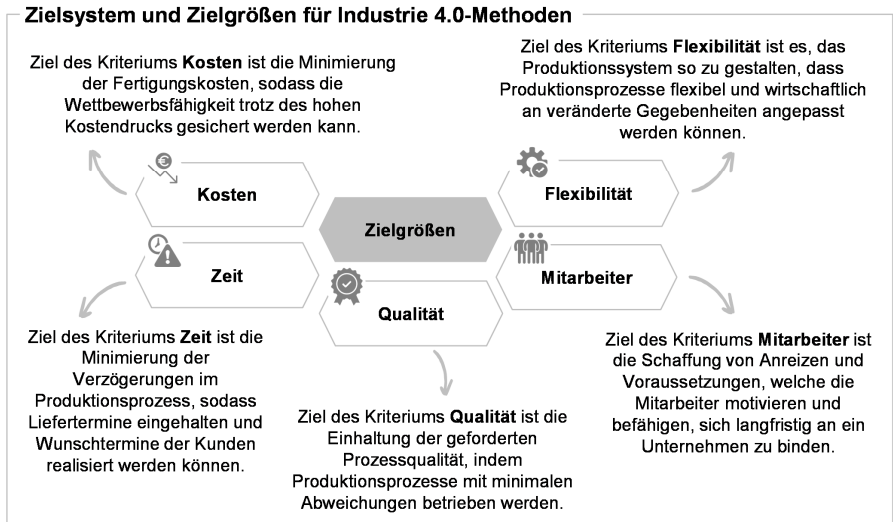


Abbildung 2-3: Zielsystem und Zielgrößen für Industrie 4.0-Methoden  
(in Anlehnung an (A\_Krogmann 2018))

### Zielgröße Kosten

In erster Linie werden Kosten als Kennzahlen in der Kostenrechnung von Unternehmen betrachtet. Diese können in direkte Kosten wie Produktions-, Material- und Personalkosten und indirekte Kosten wie Mietkosten für Immobilien oder Versicherungen unterschieden werden (Jondral 2013). Kosten werden häufig in Verbindung mit anderen Kennzahlen oder als Benchmark verwendet. Die Wirtschaftlichkeit als Kennzahl betrachtet dabei absolute Soll-Ist-Kostenabweichungen und Erlös-Kosten-Relationen (Gladen 2014). (A\_Stentzel 2018)

Das Ziel ist es somit, Fertigungskosten zu minimieren, um angesichts des hohen Kostendrucks die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Zur Erreichung dieses zentralen Ziels tragen die Industrie 4.0-Methoden bei, die eine konsequente Vermeidung von Verschwendung, eine Erhöhung der Produktivität von Personal und Betriebsmitteln sowie eine Steigerung der Auslastung von Personal und Maschinen ermöglichen (Gottmann 2016; Westkämper 2006). (A\_Krogmann 2018)

### **Zielgröße Zeit**

Die Zielgröße Zeit wird als Durchlaufzeit verstanden, die sich aus Bearbeitungs-, Transport- und Wartezeiten zusammensetzt und die Zeitspanne zwischen dem ersten und letzten Arbeitsschritt eines Werkstücks in der Produktion beschreibt (Aull 2012). Nach Kletti & Schumacher (2014) können durch die Zielgröße auch kürzere Lieferzeiten, welche zu einer höheren Kundenzufriedenheit führen, beschrieben werden.

Ziel ist es, Verzögerungen im Produktionsprozess zu minimieren, um Liefertermine einzuhalten und Wunschtermine der Kunden zu realisieren. Zur Erreichung dieser Zielsetzung tragen die Industrie 4.0-Methoden bei, die eine geringe mittlere Durchlaufzeit, eine Reduzierung von Produktionsstörungen durch die Erhöhung der Zuverlässigkeit sowie eine schnelle Reaktion auf Produktionsstörungen ermöglichen (Dombrowski & Herrmann et al. 2009; Cochran & Arinez et al. 2001). (A\_Krogmann 2018)

### **Zielgröße Qualität**

Die Definition von Qualität nach DIN 55350-11 (2008) wird beschrieben als „die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit bzgl. ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen“ (Bichler & Krohn et al. 2017). Qualität ist nicht nur ein entscheidender Faktor für die Kundenzufriedenheit, sondern sorgt auch durch vermiedene Nacharbeit oder Rückrufaktionen aufgrund mangelhafter Produkte für Kosten- und Zeiteinsparungen (Aull 2012). Zur Beurteilung der Qualität eignet sich die Ermittlung des Qualitätsgrads, in den Qualitätsverluste aus dem Anfahren eines Prozesses sowie aus dem Produktionsprozess einfließen. Dieser sagt aus, wie hoch der Anteil der Gutmenge an der produzierten Menge ist (Kletti & Schumacher 2014). (A\_Stentzel 2018)

Das Ziel ist es, die geforderte Prozessqualität einzuhalten, indem die Stabilität der Produktionsprozesse erhöht wird. Zur Erreichung dieses Ziels tragen die Industrie 4.0-Methoden bei, die das Ausschließen von systematischen Fehlern sowie die Minimierung der Streuung von Prozessen durch die Reduzierung von Prozessstörungen bewirken (Dombrowski & Herrmann et al. 2009; Cochran & Arinez et al. 2001). (A\_Krogmann 2018)

### **Zielgröße Mitarbeiter**

Vor dem Hintergrund der Einführung von Industrie 4.0 werden sich die Anforderungen an die Mitarbeiter verändern. Kontinuierliches Lernen, interdisziplinäres Denken und Handeln, ein verstärktes Verständnis von IT, die Fähigkeit zum permanenten Informationsaustausch mit Maschinen und vernetzten Systemen sowie eine aktive Teilnahme an Problemlösungs- und Optimierungsprozessen werden die in Zukunft vermehrt geforderten Kompetenzen sein. (Gebhardt & Grimm et al. 2015)

Damit die Zielgröße Mitarbeiter gemessen werden kann, werden unterschiedliche Kennzahlen aus dem Produktions- sowie Personalbereich verwendet. Ziel ist es, Anreize und Voraussetzungen zu schaffen, welche die Mitarbeiter animieren und befähigen, sich langfristig an ein Unternehmen zu binden. Dazu tragen die Industrie 4.0-Methoden bei, die die kognitive und die physische Entlastung der Beschäftigten fördern sowie die Motivation der Mitarbeiter und ihre Identifikation mit dem Unternehmen stärken (Apt & Bovenschulte et al. 2018; Gottmann 2016). (A\_Krogmann 2018)

### **Zielgröße Flexibilität**

Die Fähigkeit einer Fabrik oder eines Unternehmens, in einem sich stetig wechselnden Umfeld mit geringem Aufwand auf eine Veränderung zu reagieren, stellt einen Wettbewerbsvorteil dar (Lanza & Nyhuis et al. 2018). Je nach Betrachtungsumfang werden für diese Fähigkeit unterschiedliche Begriffe verwendet. Diese sind beispielsweise Agilität, Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit, Transformierbarkeit, Veränderungsfähigkeit oder auch Wandlungsfähigkeit (Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007). Der in dieser Arbeit stellvertretend gewählte Begriff ist Flexibilität. Dabei ist Flexibilität die „Fähigkeit, kurzfristig auf sich ändernde Vorgaben zu reagieren, um diese möglichst vollständig zu erfüllen“ (Bichler & Krohn et al. 2017).

Das Ziel ist es, ein Produktionssystem so zu gestalten, dass Produktionsprozesse wirtschaftlich flexibel an veränderte Gegebenheiten angepasst werden können (Rudtsch 2016). Zur Erreichung dieses Ziels tragen Industrie 4.0-Methoden bei, die eine Steigerung der Mixflexibilität (Fähigkeit, verschiedene Produkt-/ Variantenmixe wirtschaftlich abbilden zu können) sowie eine Erhöhung der Mengenflexibilität (Anpassungsfähigkeit an schwankende Stückzahlen) bewirken (Rudtsch 2016; Rogalski 2009). (A\_Lang 2019; A\_Krogmann 2018)

Außerdem sollte das Produktionssystem neben dem Vorbehalt dieser kurzfristigen Flexibilitätskorridore auch strukturell mit geringem Aufwand wandlungsfähig gestaltet sein.

Lanza & Nyhuis et al. (2018) identifizieren fünf in der Literatur vorherrschende Eigenschaften, die diese Dimension von Flexibilität unterstützen. Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität sind dabei aktivierbare und individuelle Objekteigenschaften. (A\_Lang 2019)

Die fünf in diesem Kapitel vorgestellten Zielgrößen werden in Kapitel 4.1 in den Methodensteckbriefen berücksichtigt. In Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4 werden die Zielgrößen als Bewertungs- und Modellierungsparameter verwendet.

## 2.4 Grundlagen der Investitions- und Risikobewertung

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen der Investitions- und Risikobewertung, die für die langfristige Wettbewerbsfähigkeit und Weiterentwicklung von Unternehmen essentiell sind. Es werden die folgenden drei methodischen Ansätze der Investitionsbewertung unterschieden: die traditionellen Verfahren der Investitionsrechnung, die multikriteriellen Entscheidungsverfahren und die erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung (siehe Abbildung 2-4).



Abbildung 2-4: Methodische Ansätze der Investitionsbewertung

Ausgewählte traditionelle Verfahren der Investitionsrechnung (Kapitel 2.4.1) und multikriterielle Entscheidungsverfahren (Kapitel 2.4.2) werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt. Außerdem wird auf Ansätze zur Risikobewertung (Kapitel 2.4.3) eingegangen.

Für den Begriff Investition gibt es in der Literatur unterschiedliche Definitionen. Eine Übersicht dazu gibt Lösch (2013). In der vorliegenden Arbeit wird unter einer Investition die Verwendung finanzieller Mittel verstanden, die durch einen hohen Kapitalbedarf und eine langfristigen Kapitalbindung charakterisiert wird (Wöhe & Döring et al. 2016). Diese Eigenschaften lassen Investitionen eine hohe strategische Bedeutung zukommen (Becker 2016).

### 2.4.1 Traditionelle Verfahren der Investitionsrechnung

Die traditionellen Verfahren der Investitionsrechnung beschränken sich auf genau eine monetäre Zielgröße und gehören somit zu den eindimensionalen Bewertungsverfahren (Zangemeister 2000). Sie betrachten ausschließlich die Wirtschaftlichkeit eines Investitionsobjekts und lassen sich bezüglich der zeitlichen Struktur der Zahlungsströme in statische und dynamische Verfahren einteilen (Heger 2007). Abbildung 2-5 zeigt die bekanntesten Verfahren der statischen und dynamischen Investitionsrechnung.

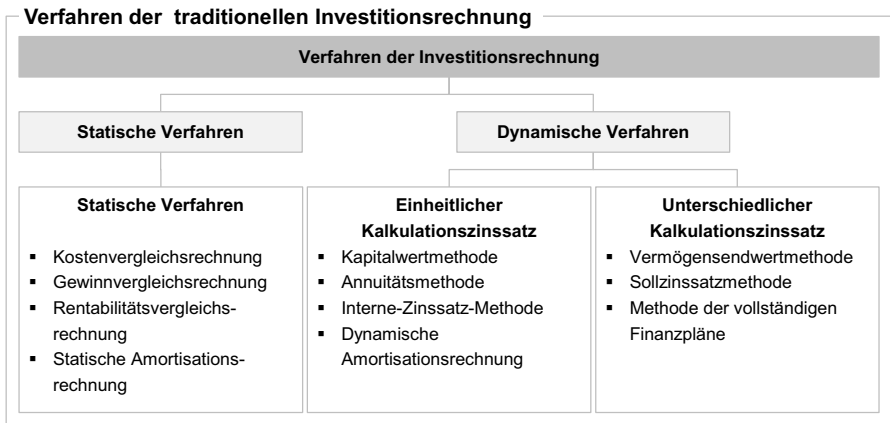


Abbildung 2-5: Verfahren der Investitionsrechnung (in Anlehnung an (Heger 2007))

#### Statische Verfahren

Statische Verfahren bestimmen die Kosten, den Gewinn, die Rentabilität oder die Rückzahlungsperiode einzelner Investitionen, um diese anschließend zu vergleichen (Singer 1990). Im Unterschied zu den dynamischen Verfahren wird eine Zeitperiode betrachtet, die üblicherweise kürzer ist als die Nutzungsdauer des Investitionsobjekts. Deshalb verwenden statische Verfahren Durchschnittswerte, wie z. B. die durchschnittlichen Kosten einer Maschine pro Jahr (Becker 2016). Der Zeitwert des Geldes wird nicht berücksichtigt. Dadurch sind die Ergebnisse ungenauer, aber die Anwendung der Verfahren kann schneller durchgeführt werden (Becker 2016; Poggensee 2015; Singer 1990).

Die statischen Verfahren lassen sich anhand der zu berücksichtigten Zielgrößen unterscheiden. Es können vier statische Investitionsverfahren abgeleitet werden: Kostenvergleichsrechnung, Gewinnvergleichsrechnung, Rentabilitätsvergleichsrechnung und statische Amortisationsrechnung.

### Dynamische Verfahren

Die dynamischen Verfahren der Investitionsrechnung betrachten alle Zahlungsströme einer Investition über den gesamten Investitionszeitraum hinweg durch das Auf- bzw. Abzinsen der Zahlungsströme unterschiedlicher Perioden auf eine Periode (Becker 2016). Die dynamischen Verfahren können anhand des verwendeten Zinssatzes in zwei Klassen eingeteilt werden. Es existieren Verfahren mit einheitlichem Kalkulationszinssatz und Verfahren mit unterschiedlichen Zinssätzen (Götze 2014).

In der Praxis werden dynamischen Verfahren mit einem einheitlichen Zinssatz eine größere Bedeutung zuteil. Insbesondere die **Kapitalwertmethode (KWM)** nimmt einen hohen Stellenwert ein und wird daher im Folgenden exemplarisch beschrieben (Götze 2014; Heger 2007; Wöhe & Döring et al. 2016). Der Kapitalwert (KW) ist die Differenz aller Ein- und Auszahlungen und ist als Summe aller auf einen bestimmten Zeitpunkt auf- und abgezinsten Zahlungen definiert (Götze 2014). Der Kalkulationszinssatz, der für Diskontierung gewählt wird, gibt die von einem Investor erwartete Mindestverzinsung an (Becker 2016). Die Berechnung des Kapitalwerts bezogen auf den Zeitpunkt  $t = 0$  wird über folgende Gleichung ausgedrückt:

$$KW = \sum_{t=0}^T (e_t - a_t) * (1 + r)^{-t} \quad 2-1$$

mit  $KW$  = Kapitalwert,  $t$  = Zeitindex,  $T$  = letzter Zeitpunkt, an dem Zahlungen anfallen,  $e_t$  = Einzahlungen zum Zeitpunkt  $t$ ,  $a_t$  = Auszahlungen zum Zeitpunkt  $t$  und  $r$  = Kalkulationszinssatz.

Die KWM bestimmt sowohl die absolute als auch die relative Vorteilhaftigkeit von Investitionen. Ein Kapitalwert größer Null ist als absolut vorteilhaft zu betrachten. (Götze 2014) Bei einem Kapitalwert gleich Null sind die Einzahlungsüberschüsse ausreichend, um die Anschaffungskosten und die Verzinsung des gebundenen Kapitals wiederzugewinnen (Becker 2016; Poggensee 2015). Die Vorteile der KWM liegen in ihrem geringen Rechenaufwand. Nachteilig ist zu sehen, dass viele verwendete Werte auf unsicheren Prognosen basieren (Götze 2014), die anteilige Zuordnung von Ein- und Auszahlungen zu den Investitionsobjekten problematisch werden kann (Becker 2016), die Annahme eines einheitlichen Zinssatzes nicht der Realität entspricht (Becker 2016) und dass die Höhe des Diskontierungzinssatzes einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis hat (Kern 1974).

Das Verfahren der KWM ist in der Praxis weit verbreitet und aufgrund der Einfachheit gerade für mittelständische Unternehmen empfehlenswert. Im Rahmen dieser Arbeit wird es daher als Grundlage der monetären Investitionsbewertung herangezogen.

#### 2.4.2 Multikriterielle Bewertungs- und Entscheidungsverfahren

Multikriterielle Entscheidungsverfahren (engl. Multi Criteria Decision Making (MCDM)) ermöglichen eine Bewertung von Entscheidungsalternativen anhand von mehreren qualitativen Faktoren (Brieker 2009). MCDM-Verfahren werden unterteilt in Verfahren mit multiplen Merkmalen, die einen diskreten, endlichen Lösungsraum aufweisen (engl. Multi Attribute Decision Making (MADM)) und in Verfahren, die einen kontinuierlichen Lösungsraum betrachten (engl. Multi Objective Decision Making (MODM)) (Krebs 2012; Brieker 2009).

Die in der vorliegenden Arbeit betrachtete Problemstellung fokussiert die Auswahl und Einführung von Methodensträngen, die einem Unternehmen einen möglichst hohen strategischen und monetären Nutzen bringen. Diese Investitionsvorhaben bilden allgemein eine diskrete Menge an Entscheidungsalternativen, weshalb nachfolgend die MADM-Verfahren fokussiert werden. Von diesen Verfahren werden die Nutzwertanalyse (NWA), der Analytische Hierarchieprozess (AHP) sowie die Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) detailliert vorgestellt und im Rahmen der in dieser Arbeit entwickelten Methodik verwendet.

Die **Nutzwertanalyse (NWA)** ist eines der bekanntesten MADM-Verfahren. Das Ziel der NWA ist es, die Nutzwerte der vorliegenden Handlungsalternativen zu bewerten und basierend darauf eine relative Rangfolge der geeignetsten Alternativen zu bilden (Sedlmeier 2014).

Der Ablauf der NWA besteht aus fünf aufeinanderfolgenden Schritten. Die Bestimmung von individuellen Zielkriterien ist der erste Schritt. Mittels des Zielbaumverfahrens, bei dem sich das Oberziel an der Spitze der Zielhierarchie befindet und sich über mehrere Stufen nach unten verzweigt, werden die Teilziele hierarchisch strukturiert (Heger 2007). Die Ziele sind so zu formulieren, dass die Zielerreichung jedes Kriteriums auf einem nominalen, ordinalen oder kardinalen Skalenniveau gemessen werden kann. Die Nutzenunabhängigkeit der festgelegten Zielkriterien und die Vermeidung einer Mehrfachnennung stellen außerdem wesentliche Bedingungen der NWA dar (Götze 2014). Monetäre Werte sollten nicht in die NWA aufgenommen werden, da Ein- und Auszah-

lungen meistens durch Faktoren beeinflusst werden, die wiederum mit anderen Kriterien korrelieren. Für den Aufbau des Zielsystems sollten 10 bis 20 Zielkriterien aufgeführt werden, um alle Aspekte des Entscheidungsproblems zu beleuchten (Kühnapfel 2017; Götze 2014). Im zweiten Schritt werden die Zielkriterien gewichtet. Dafür können verschiedene Skalierungsmethoden eingesetzt werden (Seefried 2017). Die direkte Intervallskalierung ordnet den Kriterien Werte zu, deren Abstände die Präferenzunterschiede darstellen. Die indirekte Intervallskalierung bildet zuerst eine Rangfolge über alle Zielkriterien, woraufhin die Rangziffer jedes Kriteriums in ein Gewicht umgewandelt wird, das über eine Intervallskala bestimmt wird (Götze 2014). Um eine Interpretierbarkeit des zu bestimmenden Nutzwerts zu gewährleisten, sollte eine Normierung der Gewichte durchgeführt werden (Poggensee 2015; Götze 2014). Im dritten Schritt der NWA werden Teilnutzwerte der Investitionsalternativen bezüglich aller Kriterien mittels einer Punkteskala bestimmt (Seefried 2017). Anschließend werden im vierten Schritt die Teilnutzwerte mit den dazugehörigen Kriteriengewichten multipliziert, die dann zu einem Nutzwert pro Alternative zusammengefasst werden (Poggensee 2015). Daraus folgt

$$N_i = \sum_{k=1}^K t_{ik} * w_k \quad 2-2$$

mit  $N_i$  = Gesamtnutzenwert der Alternative  $i$ ,  $t_{ik}$  = Teilnutzenwert der Alternative  $i$  und des Kriteriums  $k$  und  $w_k$  = Gewichtungsfaktor des Kriteriums  $k$  (Götze 2014).

Im fünften Schritt werden durch einen Vergleich der Nutzwerte die Alternativen evaluiert, wobei die Alternative mit dem höchsten Nutzwert vom Entscheider zu wählen ist (Seefried 2017). Zur Überprüfung der Robustheit der Ergebnisse kann im Anschluss eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, indem die Gewichtungsfaktoren verändert werden (Sedlmeier 2014).

Der von Saaty (1990) entwickelte **Analytic Hierarchy Process (AHP)** stellt ein weiteres MADM-Verfahren dar. Bei dem Verfahren wird ein Problem in hierarchisch verketete Teilprobleme unterteilt, wodurch ein paarweiser Vergleich der Alternativen hinsichtlich eines Entscheidungskriteriums ermöglicht wird (Sedlmeier 2014).

Das Verfahren wird in fünf Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt erfolgt die Bildung der Hierarchie. Dabei wird das Entscheidungsproblem hierarchisch zerlegt, indem das Oberziel zunächst in Unterziele aufgeteilt wird. Danach werden für die unterste Zielebene wiederum qualitative und quantitative Kriterien erarbeitet (Götze 2014). Auf der dritten Ebene befinden sich die Alternativen, die zuvor definierte K.O.-Kriterien erfüllen



(Riedl 2006). In Abbildung 2-6 ist eine generische Struktur des AHP dargestellt (Seefried 2017).

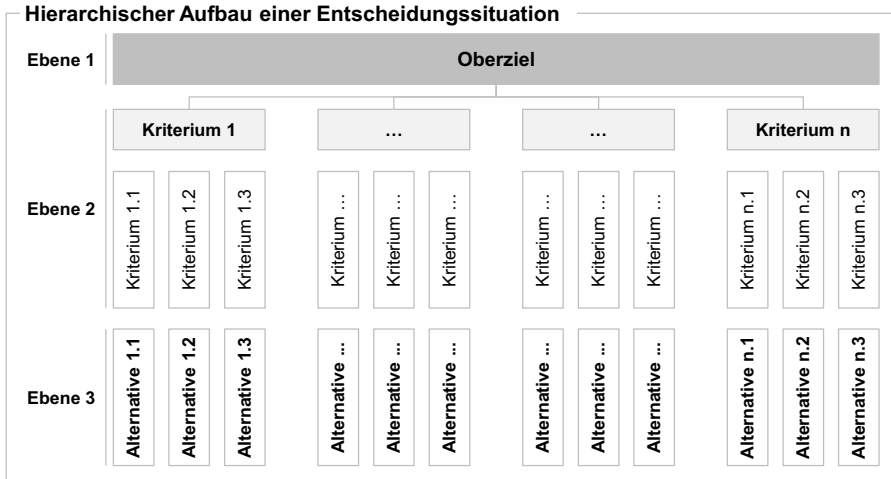


Abbildung 2-6: Hierarchischer Aufbau einer Entscheidungssituation (in Anlehnung an (Heger 2007))

Im zweiten Schritt werden alle Elemente einer Ebene mit dem jeweils übergeordneten Element hinsichtlich seines Einflusses bewertet (Seefried 2017). Damit wird die relative Bedeutung jedes Elements im Vergleich mit den anderen Elementen der gleichen Ebene bestimmt (Götze 2014). Für die paarweisen Vergleiche wird die Neun-Punkte-Skala aus Abbildung 2-7 verwendet (Saaty 1990). Die Skala umfasst die Werte 1 bis 9 sowie deren Kehrwerte. Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sind die Basis der lokalen Prioritätsvektoren, die im dritten Schritt zu einer Evaluationsmatrix aggregiert werden. Durch das Aufstellen des Eigenvektors kann eine Maßzahl für die lokale Bedeutung der einzelnen Elemente abgeleitet werden (Saaty 1990).

<b>Neun-Punkte-Skala von Saaty</b>		
<b>Skalenwert</b>	<b>Definition</b>	<b>Interpretation</b>
1	<b>Gleiche Bedeutung</b>	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element.
3	<b>Etwas größere Bedeutung</b>	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	<b>Erheblich größere Bedeutung</b>	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	<b>Sehr viel größere Bedeutung</b>	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
9	<b>Absolut dominierend</b>	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
2,4,6,8	<b>Zwischenwerte</b>	

*Abbildung 2-7: Neun-Punkte-Skala von Saaty (in Anlehnung an (Götze 2014))*

Im vierten Schritt wird die Konsistenz der Prioritätenbeurteilungen für alle Paarvergleichsmatrizen überprüft. Im Falle einer hohen Inkonsistenz müssen die Berechnungen wiederholt werden (Kamarianakis 2013). Der AHP schließt mit der Bestimmung von Ziel- und Maßnahmenprioritäten für die gesamte Hierarchie ab. Wenn auf allen Ebenen akzeptable Konsistenzwerte vorliegen, können die Gewichtungsfaktoren über alle Ebenen aggregiert werden, um den Einfluss eines Kriteriums auf das Oberziel zu erhalten. Aus den Gewichtungsfaktoren und der Vorteilhaftigkeit einer Alternative kann die globale Priorität berechnet werden. (Seefried 2017; Götze 2014; Brieke 2009)

Der AHP kann mit der NWA kombiniert werden, indem man ihn zur Ermittlung der Kriteriengewichte einsetzt (Götze 2014). Wie bei der NWA sollten beim AHP keine monetären Kriterien verwendet werden (Brieke 2009).

Das Verfahren **Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)** basiert auf der Grundidee, die Vorteilhaftigkeit von Handlungsalternativen durch Abstände zu der schlechtesten und besten Lösung zu bewerten (Hwang & Yoon 1981). Die präferierte Handlungsalternative ist die, die den kleinsten Abstand zur Ideallösung sowie den größten Abstand zur schlechtest möglichen Lösung aufweist. Aufgrund der einfachen Umsetzung hat das Verfahren eine weite Verbreitung gefunden. (Seefried 2017; Sedlmeier 2014)

Die Identifikation relevanter Kriterien und die Auswahl von Investitionsalternativen stehen zu Beginn des Verfahrens. Mit Hilfe einer einfachen Scoring-Technik werden die

Kriterien gewichtet. Die Ausprägungen  $d_{ij}$  aller Kriterien  $K_j$  (mit  $j = 1, \dots, m$ ) für jede Alternative  $A_i$  (mit  $i = 1, \dots, n$ ) werden in einer Entscheidungsmatrix  $D$  zusammengefasst dargestellt (Sedlmeier 2014; Peters & Zelewski 2007).

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nm} \end{bmatrix} \quad 2-3$$

Anschließend wird die Entscheidungsmatrix normalisiert und standardisiert, um verzerrte Kriteriengewichtungen durch Skaleneffekte zu vermeiden. Die Normalisierung der Entscheidungsmatrix kann mit Hilfe der folgenden Formel umgesetzt werden (Hwang & Yoon 1981):

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m \quad 2-4$$

Die normalisierte Entscheidungsmatrix  $R$  mit den Elementen  $r_{ij}$  wird mit den festgelegten Kriteriengewichten multipliziert, um die theoretisch optimale Lösung  $A^+$  sowie die theoretisch schlechteste Lösung  $A^-$  zu identifizieren. Durch Berechnung der euklidischen Abstände  $S_i^-$  und  $S_i^+$  der möglichen Investitionsalternativen zu den beiden Extrema wird die Bewertung durchgeführt und eine Handlungsoption abgeleitet. (Peters & Zelewski 2007; Hwang & Yoon 1981)

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m \quad 2-5$$

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m \quad 2-6$$

Hierbei stehen  $v_j^+$  und  $v_j^-$  für die Ausprägungen der theoretisch besten bzw. schlechtesten Lösung. Durch die Berechnung des Index der relativen Nähe  $C_{i^+}$ , der auf das Intervall  $[0,1]$  normiert ist, erfolgt eine Priorisierung der Alternativen (Peters & Zelewski 2007; Hwang & Yoon 1981).

$$C_{i^+} = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad \text{mit } 0 \leq C_{i^+} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad 2-7$$

Dazu werden die Alternativen bzgl.  $C_{i^+}$  absteigend sortiert und die Option mit dem höchsten Wert ausgewählt. Diese zeichnet sich durch den geringsten Abstand zur besten Lösung aus (Seefried 2017).

Die Vorteile von TOPSIS liegen in der einfachen Verständlichkeit der Methode, der Visualisierungsmöglichkeit der Distanzen und in der leichten Berechnung, die ohne den Einsatz zusätzlicher Software bewältigt werden kann. Als Kritikpunkt führen einige Autoren das Ranking auf Basis des euklidischen Abstands an und plädieren für alternative Berechnungsweisen (Seefried 2017; Sedlmeier 2014).

Im Rahmen der in dieser Arbeit entwickelten Methodik werden die NWA, das AHP-Verfahren und das TOPSIS-Verfahren angewendet.

### 2.4.3 Risikobewertung

„Risiko ist die aus der Unvorhersehbarkeit der Zukunft resultierende, durch „zufällige“ Störungen verursachte Möglichkeit, von geplanten Zielen abzuweichen“ (Gleißner 2008). In der Literatur gibt es vielfältige weitere Definitionsansätze für den Begriff Risiko (Wolke 2016).

Zur Sicherstellung des langfristigen Unternehmenserhalts ist es entscheidend, das Risiko im Rahmen des Risikomanagements zu steuern und zu verstehen (Brauweiler 2019). Das Risikomanagement wird als dynamischer Prozess mit den vier Schritten Risikoidentifikation, Risikobewertung, Risikoanalyse und Risikocontrolling gesehen (Wolke 2016). Die Risikobewertung ist der Kern des Risikomanagements und hat zum Ziel, die Effekte identifizierter Risiken zu bewerten und diesbezüglich Maßnahmen abzuleiten. Es lassen sich qualitative und quantitative Methoden unterscheiden. Zu den quantitativen Methoden gehören Risikomaße, die Sensitivitätsanalyse und die Risikosimulation. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

**Risikomaße** bilden Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf eine reelle Zahl ab, die abhängig von der Lage in unterschiedliche Ausprägungen klassifiziert werden (Gleißner 2008). Der Erwartungswert ist eine wahrscheinlichkeitstheoretische Abstraktion des arithmetischen Mittels. Der Median gibt als 50 %-Quantil einer Verteilung den mittleren Wert einer Wahrscheinlichkeitsverteilung an. Die Standardabweichung ist das gebräuchlichste lageunabhängige Risikomaß und erfasst positive wie negative Abweichungen vom Erwartungswert gleichermaßen. (Gleißner 2008)

Unsicherheiten in der Ermittlung der Zahlungshöhe können durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen berücksichtigt werden. In der Literatur findet eine Unterscheidung zwischen diskreten und stetigen Verteilfunktionen statt. Diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreiben Ereignisse, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten

oder nicht (Kamarianakis 2013). Als Beispiel können durch Anlagen- oder Systemausfälle verursachte Kosten genannt werden. Stetige Zufallsvariablen nehmen hingegen beliebige Ausprägungen innerhalb eines konkreten Bereichs an, wobei die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit über das Integral der Dichtefunktion berechnet wird. Drei stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungen bieten sich zur Modellierung der Unsicherheit bei der Investitionsbewertung an.

Die **Normalverteilung** besitzt in der Risikotheorie zur Unsicherheitsmodellierung eine hohe Bedeutung (Cottin & Döhler 2013). Eine normalverteilte Zufallsvariable  $X \sim N(\mu; \sigma^2)$  mit dem Erwartungswert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma > 0$  wird durch die Dichtefunktion

$$f_X(x)_{norm} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad 2-8$$

mit  $f_X(x)_{norm}$  = Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für eine normalverteilte Zufallsvariable  $X$  beschrieben.

Falls objektive Wahrscheinlichkeiten vorliegen, z. B. auf Grundlage von Messungen, ist die Verwendung der Normalverteilung sinnvoll. Bei subjektiven Wahrscheinlichkeiten ist die Normalverteilung nur bedingt geeignet, da sich die Standardabweichung im Vergleich zum Erwartungswert schwerer schätzen lässt. Deshalb wird bei unzureichender Informationslage auf Verteilungsfunktionen mit einfacher Parameterschätzung, wie z. B. die PERT-Beta-Verteilung, zurückgegriffen (Gleißner 2008).

Für die Modellierung von Expertenmeinungen und einer quantitativen Risikoabschätzung eignet sich die **Dreiecksverteilung**, da sie einfach und intuitiv zu ermitteln ist (Kamarianakis 2013). Dazu werden drei Parameter erfasst: ein Minimalwert  $a_{tria}$ , ein wahrscheinlichster Wert  $m_w$  sowie ein Maximalwert  $b_{tria}$ . Diese Werte sind gut zu schätzen, weshalb die Dreiecksverteilung bei Praktikern sehr beliebt ist. Der Verlauf der Dichtefunktion kann allgemein als einfache Approximation der PERT-Beta-Verteilung interpretiert werden und ist folgendermaßen definiert (Cottin & Döhler 2013):

$$f_X(x)_{tria} = \begin{cases} \frac{2 \cdot (x - a_{tria})}{(m_w - a_{tria}) \cdot (b_{tria} - a_{tria})} & \text{für } a_{tria} \leq x \leq m_w \\ \frac{2 \cdot (x - b_{tria})}{(m_w - b_{tria}) \cdot (b_{tria} - a_{tria})} & \text{für } m_w < x \leq b_{tria} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad 2-9$$

Mit  $f_X(x)_{tria}$  = Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für eine dreiecksverteilte Zufallsvariable  $X$ .

Wie die Dreiecksverteilung kann die **PERT-Beta-Verteilung** (Program Evaluation and Review Technique) ebenfalls mittels dieser drei Parameter geschätzt werden (Krebs 2012). Die Dichtefunktion der allgemeinen PERT-Beta-Verteilung auf dem Intervall  $[a, b]$  wird über die Intervallgrenzen  $a$  und  $b$  sowie die beiden Lageparameter  $\alpha$  und  $\beta$  bestimmt, wobei  $B(\alpha, \beta)$  die Eulersche Beta-Funktion darstellt, die als Normierungsfaktoren dient (Cottin & Döhler 2013):

$$f_X(x)_{beta} = \frac{(x-a)^{\alpha-1} * (b-x)^{\beta-1}}{(b-a)^{\alpha+\beta-1} * B(\alpha, \beta)} \quad \text{wobei} \quad B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1} * (1-t)^{\beta-1} dt \quad 2-10$$

Mit  $f_X(x)_{beta}$  = Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für beta-verteilte Zufallsvariable  $X$ ,  $a$ ,  $b$  = untere bzw. obere Grenze des Intervalls der PERT-Beta-Verteilung und  $\alpha$ ,  $\beta$  = Lageparameter;  $\alpha$ ,  $\beta > 0$ .

Die beiden Lageparameter  $\alpha$  und  $\beta$  können anhand des 3-Punkte-Schätzverfahrens bestimmt werden. Dazu wird ein unterer Schätzwert  $a$  und ein oberer Schätzwert  $b$ , welche die Intervallgrenzen darstellen, sowie ein wahrscheinlichster Wert  $m_w$  bestimmt. Diese drei Parameter sind als Worst Case, Best Case und Expected Case Szenarien zu interpretieren.

Durch eine entsprechende Umformung der Formeln für den Erwartungswert und die Standardabweichung ergeben sich die Formeln zur Bestimmung der Lageparameter  $\alpha$  und  $\beta$ .

$$\alpha = \left( \frac{2*(b+4m_w-5a)}{3*(b-a)} \right) * \left( 1 + 4 * \frac{(m_w-a)*(b-m_w)}{(b-a)^2} \right) \quad 2-11$$

$$\beta = \left( \frac{2*(5b-4m_w-a)}{3*(b-a)} \right) * \left( 1 + 4 * \frac{(m_w-a)*(b-m_w)}{(b-a)^2} \right) \quad 2-12$$

Mit  $a$  = untere Intervallgrenze bzw. unterer Schätzwert,  $b$  = obere Intervallgrenze bzw. oberer Schätzwert und wahrscheinlichster Wert  $m_w$ . Für eine ausführliche Herleitung dieser Formeln wird auf Davis (2008) verwiesen.

Abbildung 2-8 stellt verschiedene Dichtefunktionen der Dreiecks- und PERT-Beta-Verteilung dar.

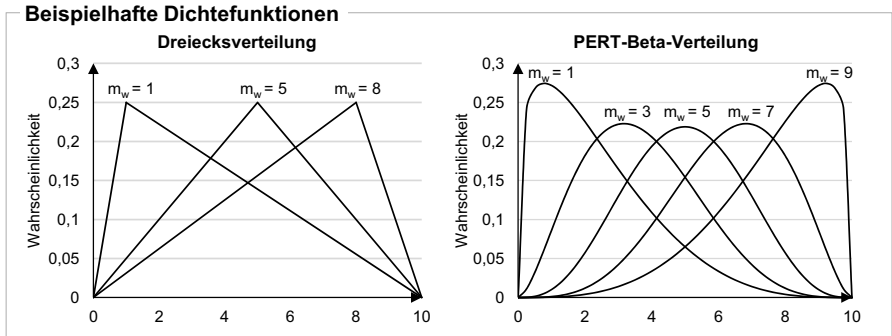


Abbildung 2-8: Dichtefunktionen der Dreiecks- und PERT-Beta-Verteilung  
(in Anlehnung an (A\_Lang 2019; Davis 2008))

Bei der **Sensitivitätsanalyse** wird das Wirkungsverhältnis zwischen Inputgrößen und Modellergebnis unter Fixierung der nicht betrachteten Parameter untersucht (Heger 2007). Es müssen quantitativ verwertbare Daten hinsichtlich der betrachteten Risiken vorliegen. Die Sensitivitätsanalyse liefert Informationen über kritische Eingangsgrößen, die einen bedeutenden Einfluss auf eine Entscheidung haben, wodurch die Unsicherheit des Entscheidungsproblems verringert werden kann. Außerdem ermöglicht die Sensitivitätsanalyse die Bestimmung der Extremwerte der Zielgrößen (von Bredow 2014).

Die bisher vorgestellten Methoden unterstützen nur die Betrachtung einzelner Risiken. Um die Risikolage eines Unternehmens oder einer Industrie 4.0-Methode zu beurteilen, muss eine Aggregation der Einzelrisiken zu einem Gesamtrisiko erfolgen. Ein mögliches Simulationsverfahren für die **Risikosimulation** ist die **Monte-Carlo-Simulation**, die es ermöglicht, einzelne Risiken und statistisches Verhalten zu simulieren sowie Risiken zu aggregieren. Die Bestimmung des Gesamtrisikos erfolgt empirisch anhand einer wiederholten Erzeugung und Kombination von Zufallszahlen für jedes Einzelrisiko (von Bredow 2014; Gleißner 2008). Die Monte-Carlo-Simulation basiert auf dem Gesetz großer Zahlen. Dieses besagt, dass sich die relative Häufigkeit eines Zufallsergebnisses um die Wahrscheinlichkeit des Zufallsergebnisses stabilisiert, wenn das entsprechende Zufallsexperiment immer wieder unter den gleichen Bedingungen wiederholt wird (Cottin & Döhler 2013).

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die PERT-Beta-Verteilung zur einfachen Modellierung der Unsicherheit bei Investitionsentscheidungen zurückgegriffen. Um Einzelrisiken zu aggregieren, wird die Monte-Carlo-Simulation verwendet.

## 2.5 Ansätze der Ablaufsimulation

Die VDI-Richtlinie 3633 beschreibt den Begriff Simulation als das „Nachbilden eines Systems mit seinen (...) Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 3633 Blatt 1 2014). Eine Simulation umfasst die Prozessschritte Modellierung, Untersuchung des Modells und die Interpretation der simulativ generierten Ergebnisse zur Anwendung auf das reale System. Das Durchführen einer Simulation zur Lösung von Problemen bzw. zur Wissensgenerierung bietet sich an, wenn dies in der realen Welt entweder nicht möglich, zu komplex oder zu aufwendig ist (Grigoryev 2016).

Modelle sind abstrakte Abbilder realer Objekte, Systeme oder Verhaltensweisen. Dafür sind Modelle auf eine Auswahl an wesentlichen Eigenschaften und Beziehungen der realen Objekte beschränkt und werden in einer formalisierten Weise beschrieben. Dies dient der Komplexitätsreduzierung und ermöglicht die Untersuchung mittels analytischer oder numerischer Lösungsverfahren. Der Prozess zur Abbildung von Objekten und Beziehungen der realen Welt auf ein Modell wird als Modellierung bezeichnet. (Bungartz & Zimmer et al. 2013)

In Abbildung 2-9 ist der allgemeine Modellierungs- und Interpretationsprozess abgebildet. Dabei wird ein Problem der realen Welt abstrahiert in einem Modell abgebildet, da eine direkte Lösung nicht oder nur mit großem Ressourceneinsatz auffindbar ist. Das konstruierte Modell wird dann untersucht. Anschließend können die Untersuchungsergebnisse wieder auf die Realität abgebildet werden und eine konkrete Lösung darstellen. (Borshchev & Filippov 2004)



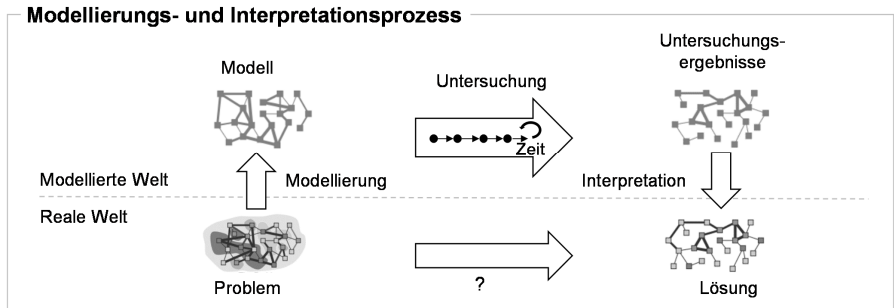


Abbildung 2-9: Ablauf einer Simulation  
(in Anlehnung an (Borshchev & Filippov 2004))

Bei der Simulationsmodellierung kann zwischen drei Methoden unterschieden werden, die als Framework zur Abbildung der realen Welt auf das Modell fungieren. Jede der drei Methoden deckt eine bestimmte Bandbreite an Abstraktion ab, dargestellt in Abbildung 2-10.

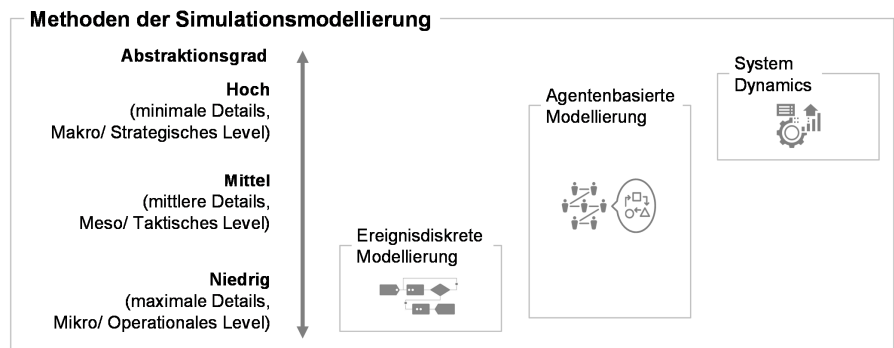


Abbildung 2-10: Methoden der Simulationsmodellierung  
(in Anlehnung an (Grigoryev 2016))

Die Auswahl einer geeigneten Methode der Simulationsmodellierung beziehungsweise der Kombination aus mehreren Methoden ist abhängig vom betrachteten Themengebiet, dem darin abzubildenden Sachverhalt und den Zielen der Modellbildung (Grigoryev 2016).

Die **ereignisdiskrete Modellierung** eignet sich für Prozesse, die durch eine Abfolge von diskreten Ereignissen geprägt sind. Beispiele dafür sind Logistik- und Fertigungsprozesse. Die ereignisdiskrete Modellierung bietet die Möglichkeit, einzelne Objekte zu verfolgen. (Gutenschwager & Rabe et al. 2017)

Die **agentenbasierte Modellierung** ist ein dezentralisierter Modellierungsansatz, der für die Modellierung einer hohen Anzahl von Individuen, den sogenannten Agenten, innerhalb eines Gesamtmodells geeignet ist. Agenten können verschiedene Arten von Objekten, Personen, Organisationen oder immateriellen Dingen darstellen. Die Agenten werden in Agententypen unterteilt. Jedem Agententyp werden spezifische Eigenschaften und Funktionalitäten zugewiesen. Die Agentenindividuen sind, um Informationen auszutauschen, in der Regel untereinander verbunden. Diese Modellierungsart besitzt ein breites Anwendungsspektrum, da sowohl die einzelnen Individuen als auch das Gesamtverhalten einer Agentenpopulation modelliert bzw. simuliert wird. (Weyer & Roos 2017; Borshchev & Filippov 2004)

Die Modellierung und Simulation mittels **System Dynamics** eignet sich zur Betrachtung komplexer und dynamischer Systeme. Es wird ein hoher Abstraktionsgrad für die Modellierung herangezogen, sodass die Methode für eine holistische Modellierung auf strategischer Ebene geeignet ist (Coyle 1996). System Dynamics ist eine von Jay W. Forrester erstmals unter dem Namen „Industrial Dynamics“ entwickelte Methode zur Simulation nichtlinearer und dynamischer Systeme, wie sie in der Sozioökonomie vorkommen (Forrester 1968). Coyle (1996) beschreibt System Dynamics wie folgt: „Die Systemdynamik beschäftigt sich mit dem zeitabhängigen Verhalten von (...) Systemen mit dem Ziel, das System zu beschreiben und durch qualitative und quantitative Modelle zu verstehen, wie Informationsfeedback das Verhalten steuert (...) und Entscheidungsstrategien durch Simulation und Optimierung zu entwerfen“. Besonderen Wert wird auf die Modellierung der Beziehungen und deren Feedbackcharakter gelegt. Neben der Modellierung, die an sich das Verständnis für das Gesamtsystem fördert, sind Simulationsstudien zur Ermittlung von Entscheidungsstrategien ein Bestandteil von System Dynamics (Coyle 1996).

Für die Erstellung von System Dynamics Simulationsmodellen hat Coyle (1996) ein Vorgehensmodell beschrieben. Das Vorgehen startet mit der Beschreibung des Problems und die Identifikation der Stakeholder. Im zweiten Schritt werden Variablen und Interdependenzen identifiziert und in einem Einflussdiagramm visualisiert. Im dritten Schritt werden Kausaldiagramme auf vorhandene Erfahrungen hinsichtlich ähnlicher

Probleme untersucht, sodass gegebenenfalls bereits eine Lösung identifiziert werden kann und damit der Prozess endet. In Schritt vier wird eine quantitative Analyse durchgeführt. Das Kausaldiagramm wird in ein Flussdiagramm übertragen, das als Basis für die Implementierung des Modells dient. Im letzten Schritt werden die Ergebnisse aus der Simulation genutzt, um das Modell zu überprüfen und zu optimieren. (Coyle 1996)

Nicht alle zu betrachtenden Problemfälle können durch eine einzige Modellierungsmethode abgebildet werden. Deshalb ist es notwendig, die jeweiligen Vorteile einzelner Modellierungsmethoden zu kombinieren. Bei globalen Abhängigkeiten wird System Dynamics miteinbezogen, bei vielen unabhängigen Objekten der agentenbasierte Ansatz und, sofern das System als konkreter Prozess beschrieben werden kann, die ereignisdiskrete Modellierung (Grigoryev 2016).

In dieser Arbeit wird auf eine Kombination der agentenbasierten Modellierung und der System Dynamics Simulation zurückgegriffen. Für das entwickelte Implementierungsreihenfolgenmodell werden verschiedene Modellierungsparameter definiert. Diese Modellierungsparameter sind die Inputfaktoren eines Simulationsmodells und können variiert werden. Detailliert werden die Modellierungsparameter in Kapitel 4.4.1 vorgestellt.

### 3 Stand der Forschung

Zur Beschreibung des Stands der Forschung werden sowohl Forschungsansätze vorgestellt, die vorrangig die Reifegradbewertung und Strukturierung von Lean- und Industrie 4.0-Methoden sowie die Wirkzusammenhänge in Produktionssystemen betrachten, als auch Ansätze, die die Bewertung von Produktionssystemen fokussieren. Die vorgestellten Forschungsansätze werden in Tabelle 3-1 entsprechend der Anforderungen an die Methodik zusammengefasst und im Folgenden im Detail erläutert.

#### 3.1 Anforderungen an die Methodik

Eine grundlegende Anforderung an die in dieser Arbeit im Zentrum stehende Methodik ist die Ausgestaltung von **Strukturierungsprinzipien** für Lean- und Industrie 4.0-Methoden. Neben allgemeinen Angaben zu den Methoden wie Beschreibung, Bezeichnung sowie einer Übersicht zu Anwendungsrisiken und -potentialen ist ein Verständnis der Methodenwirkung auf funktionaler Ebene notwendig. Um auf technologische sowie organisatorische Zusammenhänge zwischen den Methoden hinzuweisen, ist ein geeignetes Rahmenmodell zur Strukturierung einer Lean- und Industrie 4.0-Methoden-Toolbox unerlässlich. Das Rahmenmodell soll es ermöglichen, einzelne Methoden aufgrund ihrer ähnlichen funktionalen Wirkung in Kategorien zusammenzufassen und Verbindungen zwischen den Kategorien aufzuzeigen (**1. Kriterium: Strukturierung von Lean- und Industrie 4.0-Methoden, FF 1.1**).

Generell zeichnet sich Industrie 4.0 durch eine hohe technologische Komplexität, eine große Dynamik hinsichtlich der Weiterentwicklung von bestehenden Ansätzen sowie durch eine mangelnde Transparenz an vorhandenen Lösungsansätzen aus (Berg 2018). Dies stellt gerade mittelständische Unternehmen vor große Herausforderungen, da es ihnen oft an notwendigen Ressourcen (Kapazität, Know-how und Kapital) fehlt. Aus diesem Grund muss eine Methodik zur Identifikation geeigneter Industrie 4.0-Potentiale dem Anwender konkrete Handlungsalternativen in Form von spezifizierten Industrie 4.0-Methoden aufzeigen, die aus einer Sammlung von Industrie 4.0-Methoden entnommen werden. Aufgrund der Aktualität und der inhaltlichen Nähe des Themas Industrie 4.0 zum Lean-Manufacturing werden auch Ansätze wie Lean-Methoden- oder andere Sammlungen von Produktionstechnologien der Anforderung gerecht. (**2. Kriterium: Verknüpfung mit einer Lean- und Industrie 4.0-Methoden-Toolbox, FF 1.2**)

Eine weitere Anforderung an die Methodik ist die Betrachtung von **Wirkzusammenhängen und Zielgrößen**. Zur Umsetzung von Industrie 4.0 müssen verschiedene Komponenten der Informations- und Kommunikationstechnik kombiniert und oft auch in bestehende Systeme integriert werden. Dies führt dazu, dass Wirkzusammenhänge zwischen Lean- und Industrie 4.0-Methoden entstehen und zu berücksichtigen sind. Unter Wirkzusammenhängen werden in diesem Fall hauptsächlich voraussetzende Beziehungen aufgrund technologischer oder organisatorischer Abhängigkeiten zwischen den Methoden verstanden. Folglich muss eine Methodik Wirkzusammenhänge zwischen Lean- und Industrie 4.0-Methoden berücksichtigen (**3. Kriterium: Wirkzusammenhänge Lean- und Industrie 4.0-Methoden, FF 2.1**).

Damit Industrie 4.0-Methoden unternehmensspezifisch eingeführt werden können, orientieren sich die meisten Unternehmen an ihren produktionsrelevanten Zielgrößen. Dies sind im Wesentlichen die Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität. Die Umsetzung von Industrie 4.0-Methoden verspricht Verbesserungsmöglichkeiten für diese Ziele. Daraus lässt sich ableiten, dass die Auswahl von Industrie 4.0-Methoden nur unter der Berücksichtigung ihres Einflusses auf Unternehmens- bzw. Produktionsziele erfolgen kann (Dombrowski & Krenkel et al. 2018). Somit besteht eine weitere Anforderung an die Methodik darin, die Auswirkungen von Industrie 4.0-Methoden auf Unternehmens- und Produktionsziele zu bewerten (**4. Kriterium: Produktionsrelevante Zielgrößen, FF 2.2**).

Die fünfte Anforderung an die Methodik ist es, eine adäquate **Bewertung des Methodeinsatzes** bereit zu stellen. Um die strategische Bedeutung von Industrie 4.0 in die Bewertung zu integrieren, muss die Bewertung vor dem Hintergrund der unternehmensspezifischen Ziele und Strategie erfolgen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Investitionsentscheidungen die langfristige Unternehmensentwicklung unterstützen. Zusätzlich sind die unternehmensweiten Potentiale der neuen Technologien zu berücksichtigen, die sich über den Produktionsbereich hinaus erstrecken (**5. Kriterium: Strategische Bewertungsanforderungen bzgl. Industrie 4.0, FF 3.1**).

Investitionsfreigaben erfolgen immer nach Bewertung der monetären Auswirkungen auf das Unternehmensergebnis. Die Methodik muss die zahlungsbezogenen Auswirkungen der Investition abbilden. Da jedoch auch strategische Potentiale in der Bewertung berücksichtigt werden, ergibt sich die Anforderung einer kombinierten Bewertung. Daneben sind auch Unsicherheitsaspekte in die Bewertung zu integrieren, die in Form von Risiken bei quantitativen und Unschärfe bei qualitativen Einflussfaktoren auftreten

(Schönmann & Dobler et al. 2018; Reinhart & Schindler et al. 2011). Schließlich soll die Bewertung Schlussfolgerungen über die relative und absolute Vorteilhaftigkeit eines Methodenstrangs erlauben. **(6. Kriterium: Modell- und Bewertungsanforderungen für monetäre und strategische Aspekte, FF 3.2).**

Die bisher definierten Anforderungen zeigen, dass die Identifikation von geeigneten Industrie 4.0-Potentialen ein komplexes, multikriterielles Entscheidungsproblem darstellt. Um trotz der unterschiedlichen Auswahlkriterien eine begründete und eindeutige Priorisierung von Industrie 4.0-Methoden zu ermöglichen, muss die Methodik die Anforderung an ein systematisches und transparentes Auswahlverfahren erfüllen. Zusätzlich sollen die Ergebnisse verständlich und nachvollziehbar aufbereitet werden. **(7. Kriterium: Systematisches und transparentes Auswahlverfahren).**

Abhängig von den Ergebnissen der Bewertung und der simulativen Analyse der Methodenstränge sollen empfohlene Implementierungsreihenfolgen abgeleitet werden. Diese können zu einer nachhaltigen Unternehmensentwicklung genutzt werden, wenn die strategischen Prioritäten über einen längeren Zeitraum entsprechend der Implementierungsreihenfolgen definiert und angepasst werden. Durch die Zuhilfenahme von beispielsweise Roadmaps kann eine klare Vorgehensweise zur schrittweisen Umsetzung ermöglicht werden **(8. Kriterium: Implementierungsreihenfolgen, FF 4).**

### **3.2 Reifegradbewertung und Strukturierung von Lean- und Industrie 4.0-Methoden**

Es liegen viele aktuelle Herangehensweisen vor, die sich mit dem Themenfeld der Reifegradbewertung und Strukturierung von Industrie 4.0-Methoden beschäftigen. Ansätze, die vor dem Aufkommen der Digitalisierung veröffentlicht wurden, strukturieren Lean-Methoden oder andere Produktionstechnologien. Auch diese Ansätze sollen im Rahmen dieses Kapitels vorgestellt werden.

Schomburg (1980) entwickelt einen morphologischen Kasten zur systematischen Auswahl und Gestaltung EDV-gestützter Produktionsplanungssysteme. Das Vorgehen fokussiert die Entwicklung von geeigneten Betriebstypologien. Dazu werden zunächst Anforderungen relevanter Merkmale ermittelt und ihre Auswirkungen auf die Produktionsplanung dargestellt. Darauf aufbauend werden Betriebstypen abgeleitet. Durch das Vorgehen können EDV-gestützte Produktionsplanungssysteme eingegrenzt, bewertet und strukturiert werden. Ergänzende Erklärungen zu diesem Ansatz sind in Kapitel 2.2 aufgeführt.

Anderl & Picard et al. (2015) bestimmen in ihrem Vorgehen, basierend auf der systematischen Identifikation von Potentialen für Produkte und Prozesse, unternehmensspezifische Handlungsempfehlungen für Industrie 4.0-Methoden. Als Ausgangspunkt wird eine Gap-Analyse bezüglich des Ist- und des Sollzustands der Industrie 4.0-Reife im Anwendungsunternehmen durchgeführt. Darauf aufbauend werden mittels eines Workshops unternehmensspezifische Industrie 4.0-Anwendungsfälle in den Bereichen Produktion und Produkt generiert. Die Handlungsempfehlungen der erarbeiteten Anwendungsfälle werden dabei basierend auf einer BCG-Matrix gebildet, aber nicht zeitlich dargestellt. Vordefinierte Industrie 4.0-Anwendungsfälle sind nicht gegeben. Wirkzusammenhänge zwischen Anwendungsfällen werden nicht betrachtet. Spezifische Implementierungsreihenfolgen werden nicht vorgeschlagen.

Bildstein & Seidelmann (2014) beschreiben ein Vorgehensmodell zur Einführung von Industrie 4.0 in Unternehmen. Im ersten Schritt des Modells wird ein einheitliches Verständnis für Industrie 4.0 geschaffen. Daraufhin werden Industrie 4.0-Anwendungsfälle entwickelt. Als Methoden hierfür werden unter anderem eine Expertenbefragung, die Wertstromanalyse und eine Gap-Analyse vorgeschlagen. Um den Vergleich zwischen unternehmensspezifischen Anwendungsfällen und Standardanwendungsfällen zu ermöglichen, wird ein „Industrie 4.0-Werkzeugkasten“ bestehend aus einer Vielzahl an Industrie 4.0-Standardanwendungsfällen benötigt. Im nächsten Schritt werden die Anwendungsfälle nach dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis und den geringsten Umsetzungsrisiken bewertet und priorisiert. Die ausgewählten Anwendungsfälle werden anschließend im Rahmen von Pilotprojekten umgesetzt. Erfolgreiche Anwendungsfälle werden für den Rollout im gesamten Unternehmen vorbereitet. Dieses Modell wird von Bauernhansl (2016) weiterentwickelt. Im Rahmen des Opportunity Push werden auf Basis bestehender Industrie 4.0-Anwendungen im Unternehmen unternehmensspezifische Use Cases definiert. Ein „Industrie 4.0-Werkzeugkasten“ wird konzeptionell beschrieben, aber nicht ausgearbeitet. Wirkzusammenhänge zwischen Anwendungsfällen werden nicht berücksichtigt.

Greitemann (2016) entwickelt eine Methodik für die systematische Identifikation von Produktionstechnologien. Die Methodik beginnt mit der Analyse des zukünftigen Technologiebedarfs. Danach schließt sich die Suche nach Technologien an. Die gesammelten Informationen über eine Technologie werden zuletzt in einem Technologiesteckbrief

zusammengefasst. Die Methodik wird exemplarisch an einem Anwendungsfall aufgezeigt. Es wird keine Sammlung von Technologiesteckbriefen vorgenommen und Wirkzusammenhänge zwischen Technologien werden nicht betrachtet.

Jodlbauer & Schagerl (2016) beschreiben ein reifegradbasiertes Vorgehensmodell zur Identifikation von Industrie 4.0-Potentialen. Zur Reifegradbestimmung werden die Dimensionen Daten, Intelligenz und Digitale Transformation verwendet, die aufeinander aufbauen. Für jedes Subkriterium der drei Dimensionen existieren dabei individuelle Referenztabellen, in denen der Ist-Zustand mittels einer Reifegradskala bewertet wird. Unter Berücksichtigung der Ist-Analyse sowie der Strategie und den definierten Zielen des Applikationsfelds wird eine Soll-Reife definiert. Zur Erreichung der Soll-Reife werden anschließend Projektvorschläge erarbeitet, welche in einem Ergebnisworkshop mit dem Unternehmen diskutiert und in konkrete Umsetzungsschritte überführt werden. Das Vorgehensmodell basiert auf dem digitalen Reifegrad eines Unternehmens, ermöglicht die Berücksichtigung von Unternehmens- bzw. Produktionszielen, zeigt Handlungsalternativen auf und ist individuell an die Situation und Bedürfnisse eines Unternehmens anpassbar. Wirkzusammenhänge zwischen den Projektvorschlägen werden nicht beachtet. Zusätzlich ist nicht erläutert, woher die Projektvorschläge zur Erreichung der Soll-Reife stammen und wie diese letztlich priorisiert bzw. ausgewählt werden. Eine Verknüpfung mit einer Methodensammlung ist nicht erkennbar.

Mit Hilfe des von Merl (2016) entwickelten Ansatzes können Lean-Methoden für die Umsetzung eines GPS unternehmensspezifisch ausgewählt werden. Hierzu kann ein zielorientierter oder ein problemorientierter Ansatz verfolgt werden. Basis für die Arbeit bildet eine umfassende Methoden-Toolbox ganzheitlicher Produktionssysteme. Hierzu analysiert Merl (2016) mehrere bestehende Methodensammlungen und fasst diese zu einer einzigen großen Sammlung zusammen. Zusätzlich bestimmt er dabei jeweils den Einfluss der Methoden auf die jeweiligen Zielgrößen des Produktionssystems.

Merz (2016) präsentiert ein Vorgehensmodell zur strukturierten, ganzheitlichen Einführung von Industrie 4.0 unter Berücksichtigung strategischer, taktischer und operativer Aspekte. Das Vorgehensmodell besteht aus den Schritten Industrie 4.0-Ist-Analyse, Industrie 4.0-Zielbestimmung und Industrie 4.0-Maßnahmenumsetzung. Durch eine Status Quo Analyse wird abgeleitet, ob im Unternehmen bereits Use Cases bezüglich Industrie 4.0 umgesetzt werden. Das Ergebnis wird in einer Matrix zusammengefasst, die den Anpassungsbedarf der Geschäftsstrategie der Industrie 4.0-Erfahrung des Unter-



nehmens gegenüberstellt. Basierend auf dieser Matrix erfolgt eine Industrie 4.0-Zielbestimmung und es werden unterschiedliche strategische Entwicklungsszenarien vorgeschlagen. Eine Sammlung von Industrie 4.0-Methoden wird nicht betrachtet.

Seiter & Bayrle et al. (2016) stellen einen Ansatz zur Unterstützung der Umsetzung von Industrie 4.0-Potentialen vor. Mittels eines Quick-Checks wird eine Bestandsaufnahme des Unternehmens durchgeführt, um Industrie 4.0-Potentiale zu identifizieren. Die Potentiale werden anschließend anhand eines Bewertungskatalog und einer Potential-Matrix nach Umsetzbarkeit und wirtschaftlichem Potential priorisiert und bewertet. Qualitative, nicht-monetäre Effekte werden durch die Extended Performance Analysis ermittelt. In der letzten Phase erfolgt die Entwicklung einer Industrie 4.0-Roadmap für jedes Potential. Dadurch wird der zeitliche Verlauf der notwendigen Implementierungsschritte aufgezeigt.

Pessl & Sorko et al. (2017) präsentieren ein ganzheitliches Vorgehensmodell zur Erstellung einer unternehmensspezifischen Industrie 4.0-Roadmap. Industrie 4.0-Maßnahmen werden hierbei aufgrund ihrer Relevanz und ihres Beitrags zur Unternehmensstrategie ausgewählt. Zunächst wird durch Workshops ein einheitliches Verständnis für Industrie 4.0 geschaffen. Anschließend wird mit einem Reifegradmodell der Ist-Zustand ermittelt. Um den Ziel-Zustand zu erreichen, werden im nächsten Schritt konkrete Maßnahmen festgelegt, bewertet und in einer Portfolio-Matrix dargestellt. Die final ausgewählten Ziele und Maßnahmen werden anschließend in eine Balanced Scorecard überführt und mit Kennzahlen sowie messbaren Umsetzungszielen verknüpft. Im letzten Schritt des Vorgehensmodells werden aufbauend auf den bestimmten Maßnahmen und Zielen konkrete Umsetzungsprojekte definiert. Eine direkte Verknüpfung mit einer Methoden-Toolbox wird nicht hergestellt, da die Generierung der Maßnahmen auf Basis von Kreativitätstechniken erfolgt. Wirkzusammenhänge zwischen den Maßnahmen werden nicht beachtet. Eine begründete Priorisierung der Maßnahmen wird durch die Abschätzung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses ermöglicht. Allerdings werden keine näheren Angaben gemacht, welche Kriterien hierfür verwendet werden. Außerdem werden keine Implementierungsreihenfolgen aufgezeigt.

Rößler & Hashemi (2017) präsentieren mit ihrem Smart Factory Assessment eine Methodik zur integralen Reifegradbewertung von Produktion und Logistik hinsichtlich Lean-Management und Industrie 4.0. Das Assessment stellt eine expertenbasierte Schnellbewertung dar und ermöglicht die Definition konkreter Verbesserungspfade in

Bezug auf Lean-Management und Industrie 4.0. Durch Kurzinterviews wird die Ist-Situation analysiert. Anschließend wird auf Basis einer Begehung des Fabrikbereichs eine Bewertung von Lean- und Industrie 4.0-Kriterien durchgeführt. Unter Berücksichtigung der eingangs festgelegten Optimierungsziele werden daraufhin Zielwerte definiert. Um die Differenz zwischen Ist- und Soll-Reifegrad zu schließen, werden Verbesserungshebel ermittelt und diskutiert. Diese stellen die abschließenden Handlungsempfehlungen dar. Eine direkte Verknüpfung mit einer umfassenden Methoden-Toolbox wird nicht hergestellt. Außerdem werden keine Wirkzusammenhänge zwischen den Verbesserungshebeln beachtet.

Dombrowski & Krenkel et al. (2018) präsentieren ein strukturiertes Vorgehen, mit dem das Potential von Industrie 4.0-Technologien bewertet werden und so eine zielorientierte Auswahl von Industrie 4.0-Technologien erfolgen kann. Um Verbesserungspotentiale zu identifizieren, wird zunächst eine Wertstromanalyse durchgeführt, der Ist-Zustand des Wertschöpfungsprozesses aufgenommen und die identifizierten Schwachstellen analysiert. Darüber hinaus wird der Aufbau eines sogenannten „Werkzeugkastens“, der verschiedene Industrie 4.0-Anwendungsfälle enthält, empfohlen, sodass gezielt Lösungskonzepte für bestimmte Probleme und deren Ursachen ausgewählt werden können. Nach der Identifizierung geeigneter Industrie 4.0-Technologien werden diese mit Hilfe der Nutzwertanalyse bewertet. Der bewertete Nutzen wird anschließend dem Einführungsaufwand gegenübergestellt und in ein Technologie-Portfolio eingeordnet. Dieser Ansatz ermöglicht es, Unternehmens- bzw. Produktionsziele zu berücksichtigen, beinhaltet ein systematisches und transparentes Auswahlverfahren und ermöglicht somit die begründete Priorisierung von Lösungen. Unklar ist, ob der digitale Reifegrad eines Unternehmens bei der Bewertung der Machbarkeit berücksichtigt wird und woher die zu bewertenden Lösungsansätze bzw. Industrie 4.0-Technologien stammen.

Das anwendungsorientierte Lean Production Framework 4.0 von Dombrowski & Richter (2018) stellt einerseits die Interdependenzen zwischen Industrie 4.0 und dem Lean Production System (LPS) dar, und bietet andererseits eine Toolbox von LPS-Methoden, erweitert um das Industrie 4.0 Framework, den LPS 4.0-Methodenkatalog. Dieser soll Unternehmen bei der Identifikation von Potentialen der Industrie 4.0 sowie bei der Bewertung des individuellen Nutzens unterstützen. Der LPS 4.0-Methodenkatalog basiert auf bestehenden und bekannten LPS-Methoden, basierend auf VDI 2870 Blatt 1 (2012) und VDI 2870 Blatt 2 (2013), welche weiterentwickelt werden. Die einzelnen Methoden

des Katalogs werden durch ihren Einfluss auf die Zielgrößen Qualität, Kosten, Zeit, Risiko, Potential und Aufwand beschrieben, der durch 260 Use Cases bestimmt wurde. Zusätzlich stellen Dombrowski & Richter et al. (2017) die Wirkzusammenhänge zwischen GPS und Industrie 4.0 durch eine Use Case-Analyse dar. Darauf aufbauend wird eine Strukturierung der analysierten Industrie 4.0-Elemente vorgestellt. Die Strukturierung unterteilt sich in die Kategorien Prozesseigenschaften, Systeme und Technologien. Eine strategische und monetäre Bewertung wird nicht durchgeführt und Implementierungsreihenfolgen nicht abgeleitet.

Hanschke (2018) beschreibt einen praxisorientierten Ansatz zur digitalen Transformation. Dabei soll anhand der Unternehmensvision eine passende digitale Strategie entwickelt und umgesetzt werden. Dies geschieht auf Grundlage von einem Soll-Ist-Abgleich, bei dem Handlungsfelder abgeleitet und digitale Lösungen zur Schließung der Lücke mit Hilfe einer Projektportfolio-Matrix (Kosten/ Nutzen und Risiko) bestimmt werden. Die priorisierten Lösungen werden in einer schrittweisen Transformations-Roadmap verankert.

Lanza & Nyhuis (2018) stellen ein Vorgehensmodell zur Einführung von Industrie 4.0 vor. Das „Intro 4.0“-Vorgehensmodell teilt sich in die vier Schritte Initiative, Industrie 4.0-Assessment, Methodenspezifizierung und Risiko-Potential-Analyse sowie Implementierung auf. Eine Industrie 4.0-Methoden-Toolbox wird vorgestellt, aber nicht näher spezifiziert. Erste Ansätze zur Analyse von Wirkzusammenhängen und der Bewertung von Produktionssystemen werden aufgezeigt. Der Schritt Methodenspezifizierung und Risiko-Potential-Analyse des entwickelten Vorgehensmodells stellt eine Grundlage der vorliegenden Arbeit dar.

Morlock & Wienbruch (2016) entwickeln ein iteratives Vorgehensmodell zur Einführung von Industrie 4.0. Dieses basiert auf einem Industrie 4.0-Audit, der die Dimensionen Technik, Organisation und Personal in den Mittelpunkt stellt. Anhand des Ist-Reifegrads wird ein Soll-Reifegrad definiert und Maßnahmen eingeleitet, bis der Zielzustand erreicht ist. Dieses Modell wird von Leineweber & Wienbruch et al. (2018) zu einem evolutionären, reifebasierten Migrationsmodell weiterentwickelt, das Unternehmen auf ihrem Weg zu Industrie 4.0 begleitet sowie Wirkzusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Kriterien einbezieht. Eine Sammlung von Industrie 4.0-Methoden wird nicht betrachtet.

Matt & Unterhofer (2018) entwickeln ein Modell zur Implementierung von Industrie 4.0-Konzepten. Dabei wird zunächst die Ist-Situation bewertet, anschließend ein Ziel-Szenario beschrieben und daraufhin eine Umsetzungs-Roadmap definiert. Industrie 4.0-Konzepte werden in Form von Workshops erarbeitet. Eine vordefinierte Sammlung von Konzepten ist nicht beschrieben. Wirkzusammenhänge zwischen einzelnen Konzepten werden nicht betrachtet.

Nöhring & Wöstmann et al. (2018) beschreiben einen Ansatz für die zielgerichtete Auswahlhilfe von Industrie 4.0-Lösungen. Basis für die Auswahlhilfe bildet die Verknüpfung von Industrie 4.0-Lösungen mit Unternehmenszielen über relevante operative Kennzahlen sowie die Sammlung von Industrie 4.0-Lösungen in einem Webtool. Das Auswahlverfahren berücksichtigt Unternehmens- bzw. Produktionsziele, schlägt durch die Verknüpfung mit einer Datenbasis Handlungsalternativen vor und ist an die individuellen Bedarfe eines Unternehmens anpassbar. Der digitale Reifegrad eines Unternehmens, Wirkzusammenhänge zwischen Industrie 4.0-Lösungen sowie die übergeordnete Systemperspektive einer Lösung werden nicht berücksichtigt. Des Weiteren erfolgt keine Priorisierung oder weitere Empfehlung der vorgeschlagenen Lösungen.

Schuh & Anderl et al. (2017) ordnen die Unternehmen im Industrie 4.0 Maturity Index mit Hilfe definierter Reifegrade bezüglich ihrer Industrie 4.0-Einführung ein, um daraus konkrete Maßnahmen für die Verbesserung des Reifegrads abzuleiten. Dabei werden technologische, organisatorische und kulturelle Aspekte betrachtet. Dazu müssen für insgesamt vier Gestaltungsfelder (Ressourcen, Informationssysteme, Organisationsstruktur und Kultur) je zwei Prinzipien bewertet werden, die zusammen den Reifegrad innerhalb des Gestaltungsfelds ergeben. Die Reifegrade unterteilen sich dabei in sechs Stufen: Computerisierung, Konnektivität, Sichtbarkeit, Transparenz, Prognosefähigkeit und Adaptierbarkeit. Die Bewertung der Gestaltungsfelder erfolgt durch Experten im Rahmen von Interviews, Vor-Ort-Begehungen und Workshops. Darauf aufbauend wird eine Gap-Analyse durchgeführt, die den Handlungsbedarf für die einzelnen Gestaltungsfelder definiert. Im letzten Schritt werden konkrete Maßnahmen für die Erreichung des definierten Soll-Zustands abgeleitet. Dazu werden die einzelnen Maßnahmen mittels einer Aufwand-Nutzen-Matrix bewertet. Dieser Ansatz wird mit dem Leitfadens von Schuh & Boos et al. (2018) weiterentwickelt.

Hoellthaler & Braunreuther et al. (2019) beschreiben ein Vorgehensmodell, das sowohl die Anforderungen zur Bestimmung der Auswirkungen von Digitalisierungstechnologien

auf Lean-Produktionssysteme, als auch die Auswahl unternehmensspezifischer Digitalisierungstechnologien abdeckt. Bei der Implementierung von Digitalisierungswerkzeugen mit dem Ziel, Lean-Methoden zu berücksichtigen, sind daher vor allem die Auswirkungen innerhalb von komplexen Lean-Produktionssystemen zu analysieren. Der Ansatz besteht aus den Kernmodulen Identifikation von Potentialen, System für Interdependenzen, Identifikation von Auswirkungen sowie der Bewertung und Auswahl. Ergänzt wird das Vorgehensmodell durch Hoellthaler & Weissenborn et al. (2019), die die Bewertung von Lean-Produktionssystemen im Rahmen der Digitalisierung vertiefen.

Mittal & Khan et al. (2019) entwickeln ein Einführungsmodell für Industrie 4.0 bei KMUs. Das KMU-Reifegradmodell von Mittal & Romero et. al (2018a) soll KMUs bei dem Weg der digitalen Transformation und dem Paradigmenwechsel zu Smart Manufacturing und Industrie 4.0 auf den drei Achsen organisatorische Dimensionen, Toolboxes und Reifegrade unterstützen. Das Toolkit ermöglicht Unternehmen die unternehmensspezifische Bestimmung des Ist-Reifegrads sowie eine Methodentoolbox (Mittal & Romero et al. 2018b) zur Erreichung höherer Reifegradstufen. Dabei werden wichtige Faktoren wie Wirkzusammenhänge, monetäre Bewertungen sowie die eigentliche Umsetzung vernachlässigt.

Siedler & Sadaune et al. (2019) stellen einen Ansatz vor, der es Unternehmen ermöglicht, mittels einer Technologie-Map individuell Technologien bewerten zu können, die sowohl geeignet als auch profitabel sind. Durch die Technologie-Map werden Digitalisierungstechnologien nach ihrem Verwendungszweck sowie dem Zeitpunkt der Implementierung kategorisiert. Zur Vereinfachung der Identifizierung von Digitalisierungslösungen kann auf eine Liste bestehender Möglichkeiten zurückgegriffen werden. Diese werden in Steckbriefen beschrieben. Dabei werden Anforderungen und Voraussetzungen definiert, Vor- und Nachteile aufgezählt, Auswirkungen auf Mitarbeiter abgewogen und Anwendungsbeispiele genannt.

### **3.3 Analyse von Wirkzusammenhängen in Produktionssystemen**

In diesem Abschnitt wird eine Übersicht über diejenigen Ansätze gegeben, die die Wirkzusammenhänge und Zielgrößen von Lean-Methoden in Produktionssystemen analysieren. Diese wird durch aktuelle Ansätze mit dem Fokus auf Industrie 4.0 ergänzt.

Rivera & Chen (2007) stellen die wirtschaftlichen Potentiale von Lean-Methoden in Form von „Cost-Time-Profiles“ dar. Dabei handelt es sich um den Auftrag der kumulierten Produktionskosten eines Produkts über der verstrichenen Durchlaufzeit. Es können wirtschaftliche Vorteile durch Materialeinsparung, Aktivitätsbeschleunigung und Wartezeitminimierung dargestellt werden. Außerdem können mittels dieser Cost-Time-Profiles auch die Auswirkungen von Lean-Methoden auf die Durchlaufzeit oder auf die direkten Produktionskosten ermittelt werden. Aus diesem Grund können diese Cost-Time-Profiles laut Rivera & Chen (2007) dazu genutzt werden, die Effektivität von Lean-Management zu bewerten und die damit verbundenen Investitionen zu begründen. Als Ergebnis werden Implementierungsreihenfolgen für ausgewählte Lean-Methoden abgeleitet.

Peter (2009) beschreibt die Analyse von Wirkzusammenhängen von Lean-Methoden in einer Kleinserienproduktion. Das Ziel ist es, die Effektivität der Methoden in Abhängigkeit der Produktionsstruktur zu bewerten und zu optimieren. Das Ergebnis ist ein theoretisches Wirkgefüge sowie eine Bewertungsmethodik der Effektivität von Lean-Methoden. Dazu werden die qualitativen und quantitativen Wirkzusammenhänge in Bezug auf verschiedene Einflussfaktoren, Produktionskennzahlen und Zielgrößen eines Produktionssystems analysiert. Grundlage hierfür bildet das Konzept von System Dynamics. Implementierungsreihenfolgen werden für die analysierten Lean-Methoden nicht abgeleitet.

Al-Aomar (2011) präsentiert einen simulationsbasierten Ansatz für die Optimierung von Lean-Methoden, bei dem die Kennzahlen Durchlaufzeit, Produktivität und Umlaufbestand als geeignete Beschreibung des Produktionssystems berücksichtigt werden. Das multikriterielle Optimierungsproblem wird durch eine diskrete ereignisgesteuerte Simulation und die Optimierungsheuristik Simulated Annealing bearbeitet. Durch die Verknüpfung der Heuristik mit der Simulation kann ermittelt werden, welche Methode sich am günstigsten auf die Zielgrößen auswirken. Eine Implementierungsreihenfolge wird nicht abgeleitet.

Aull (2012) entwickelt in seiner Arbeit ein Modell zur Definition von Implementierungsreihenfolgen für die Einführung von Lean-Management-Methoden. Damit versucht er, eine Entscheidungsunterstützung für Unternehmen zu bieten, die gerade dabei sind, ihr Produktionssystem entsprechend der Lean-Philosophie zu gestalten. Ausgangspunkt dieses Ansatzes ist eine Interdependenzmatrix, die die Abhängigkeiten und Wirk-

beziehungen einzelner Lean-Methoden darstellt. Diese Matrix wird mittels Experteninterviews und einer Literaturrecherche für 18 Lean-Methoden erstellt. Dabei werden in der Matrix für die einzelnen Methoden Modellierungsparameter definiert und bewertet. Ausgehend von dieser Matrix werden mittels System Dynamics Modellen unternehmensspezifische Implementierungsreihenfolgen für Lean-Methoden abgeleitet. Zudem werden allgemeingültige Aussagen im Bezug auf die Einführung von kombinierten Lean-Methoden untersucht. Monetäre und strategische Bewertungsanforderungen werden nicht berücksichtigt. Der Ansatz stellt eine Grundlage für Phase 3 (siehe Kapitel 4.4) dar.

Jondral (2013) entwickelt eine Optimierungs- und Bewertungsmethodik für den Lean-Methodeneinsatz in Produktionssystemen. Dabei wird ausgehend von einer Datenaufnahme und einem Lean-Check zur Bestimmung möglicher Lean-Methodenalternativen ein Simulationsmodell des Produktionssystems erstellt. Damit werden verschiedene Simulationsexperimente durchgeführt, die die Datengrundlage für die Alternativenbewertung darstellen. Die eigentliche Bewertung nutzt Cost-Time-Profiles nach Rivera & Chen (2007). Zusätzlich wird die erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung nach Brieke (2009) und Zangemeister (2000) verwendet, um auf Basis von Simulationsdaten und mit Hilfe von Kausalketten eine ganzheitliche finanzielle Bewertung in Form eines Kapitalwerts vorzunehmen. Anschließend werden Robustheitsuntersuchungen bzw. Sensitivitätsanalysen im Rahmen von Stückzahl- und Produktmixänderungen durchgeführt. Implementierungsreihenfolgen werden für die analysierten Lean-Methoden nicht abgeleitet.

Dombrowski & Ebentreich et al. (2016) erläutern ein Vorgehen zur Analyse der Wirkzusammenhänge von Lean-Methoden auf der Grundlage des Modellierungskonzeptes von System Dynamics. Das Ziel ist die Modellierung des dynamischen Verhaltens und die Einordnung einer ausgewählten Methode innerhalb eines Produktionssystems. Im Gegensatz zu Aull (2012) werden die Beziehungen nicht qualitativ, sondern quantitativ ermittelt. Wirkzusammenhänge zwischen verschiedenen Methoden werden nicht berücksichtigt und deshalb auch keine Implementierungsreihenfolgen abgeleitet.

Stricker (2016) ermittelt in ihrem Ansatz ein umfangreiches Kennzahlensystem zur Robustheitsbewertung von Produktionssystemen. Die Systeme lassen sich dabei in einem Simulationsmodell abbilden, mit Hilfe dessen Verbesserungsmaßnahmen hinsichtlich der Robustheit und den damit verbundenen Kosten abgeleitet werden können.

Michaeli (2017) entwickelt ein Verfahren, mit Hilfe dessen eine Produktionsstrategie für ein Unternehmen hergeleitet werden kann. Hierfür analysiert er neben den produktionsstrategischen Handlungsfeldern auch die spezifischen Einflussfaktoren des Unternehmens und leitet mittels der SWOT- und der Gap-Analyse den Handlungsbedarf je Handlungsfeld ab. Zusätzlich werden die Wirkzusammenhänge zwischen den produktionsstrategischen Handlungsfeldern analysiert und bewertet. Mit Hilfe dieser Informationen wird im letzten Schritt ein produktionsstrategisches Zielsystem abgeleitet und eine Produktionsstrategie formuliert. Eine Methoden-Toolbox liegt nicht vor und Implementierungsreihenfolgen werden nicht abgeleitet.

Siedler & Langlotz et al. (2019) bieten eine Möglichkeit für Unternehmen, auftretende Wirkzusammenhänge zwischen neuen und bereits vorhandenen digitalen Technologien innerhalb des Fertigungssystems individuell festzustellen. Zunächst werden alle existierenden digitalen Technologien innerhalb des berücksichtigten Prozesses identifiziert und in einzelne Prozessschritte heruntergebrochen. Verschiedene Prozessschritte können dabei unterschiedliche digitale Technologien enthalten. Nach der Identifikation von potentiellen Technologien werden diese auf Erfüllung der Voraussetzungen überprüft. Dazu wird eine Wirkungsmatrix mit den Kriterien keine Vorbedingung, optionale Vorbedingung oder obligatorische Vorbedingung aufgestellt. Im darauffolgenden Schritt werden die Beziehungen zwischen den verwendeten und den potentiellen neuen digitalen Technologien kategorisiert (identisch, komplementär, neutral, konkurrierend oder widersprüchlich). Dies hilft, mögliche Wirkzusammenhänge zwischen digitalen Technologien zu identifizieren und erleichtert die Entscheidung darüber, welche digitale Technologie eingesetzt werden soll. Im letzten Schritt werden mit Hilfe einer Domain-Mapping-Matrix die Wirkzusammenhänge zwischen den digitalen Technologien sowie deren Zuordnung zu den betrachteten Prozessschritten dargestellt. Langlotz und Aurich (2019) führen diesen Ansatz weiter aus und schlagen eine Methodenbibliothek für die Kombination der Elemente eines GPS (in Anlehnung an (VDI 2870 Blatt 1 2012; VDI 2870 Blatt 2 2013)) und Industrie 4.0-Technologien vor.

### **3.4 Bewertung von Produktionssystemen**

Die betrachteten Ansätze zur Bewertung von Produktionssystemen fokussieren strategische und monetäre Aspekte. Der Fokus liegt auf Produktionstechnologien, die mittels multikriterieller Verfahren bewertet werden.



Abdel-Kader & Dugdale (2001) erstellen ein Modell zur Investitionsbewertung von Advanced Manufacturing Technologies, das eine monetäre und strategische Bewertung sowie eine Risikobewertung beinhaltet. Dazu werden auf der ersten Stufe die Investitionsalternativen im Rahmen des sogenannten Strategie-Tests auf ihren strategischen Fit geprüft. Für die weitere Evaluierung sind nur Investitionsprojekte von Interesse, die zur Erreichung der Unternehmensziele maßgeblich beitragen. Auf der zweiten Stufe werden die Investitionsalternativen anhand von monetären, strategischen und Risikokriterien bewertet. Während die monetäre Bewertung auf Grundlage des Fuzzy-Kapitalwerts oder einer anderen fuzzyfizierten monetären Kennzahl erfolgt, werden bei der strategischen und der Risikobewertung zunächst Kriterien identifiziert und mittels des AHP-Ansatzes hierarchisch strukturiert. Anhand von Fuzzy-Skalen werden paarweise Vergleiche zwischen den Kriterien und Alternativen durchgeführt, um eine Maßgröße für jede Alternative bestimmen zu können. Auf der dritten Stufe werden die drei Fuzzy-Bewertungsdimensionen der Investitionsalternativen in vergleichbare Werte transformiert und dreidimensional visualisiert. Auf eine Aggregation der drei Dimensionen wird bewusst verzichtet, da dies einen Informationsverlust der Ergebnisse zur Folge hätte.

Fiebig (2004) entwickelt einen Planungsansatz zur Synchronisation von Technologie- und Fabrikplanung, wobei der Ansatz die Fabrik-Roadmap mit der Technologie-Roadmap verknüpft. Mittels der Fabrik-Technologie-Portfolio-Methode werden die geeignetsten Technologien für ein leistungsfähiges Fabrikkonzept ausgewählt und eine Implementierungsreihenfolge abgeleitet.

Krebs (2012) entwickelt eine Methodik zur Bewertung vernetzter Produktionsstandorte, die es ermöglicht, sowohl quantitative als auch qualitative Unsicherheiten zu integrieren und monetär zu quantifizieren. Basierend auf ermittelten Einflussfaktoren für die Bewertung wird ein Unsicherheitsmodell aufgestellt, das die einzelnen Unsicherheiten und deren Abhängigkeiten über die Wahrscheinlichkeitstheorie und das Fuzzy-Bewertungsnetz abbildet. Die eigentliche Bewertung erfolgt durch die Verknüpfung mit dem Unsicherheitsmodell und einem entwickelten Kalkulationsmodell mittels Monte-Carlo-Simulation.

Brieke (2009) verwendet beim entwickelten Verfahren der erweiterten Wirtschaftlichkeitsberechnung in der Fabrikplanung zum einen die Kapitalwertrechnung für monetäre Größen und versucht andererseits, qualitative Größen zu monetarisieren bzw. wendet zur Ermittlung des Zusatznutzens die Nutzwertanalyse an. Die in Schulze & Brieke et

al. (2012) dargestellte Methode der erweiterten Wirtschaftlichkeitsrechnung basiert auf Brieke (2009), Kolakowski & Schady et al. (2007) und Zangemeister (2000).

Irrenhauser (2014) entwickelt eine Methodik zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von RFID-Systemen in Wertschöpfungsnetzwerken, die sich in eine Analyse- und in eine Bewertungsphase gliedert. In der Analysephase wird der Wertschöpfungsprozess bezüglich möglicher Nutzenpotentiale und Aufwände genauer untersucht. Auf Basis der identifizierten Einflussfaktoren erfolgt in der Bewertungsphase die monetäre Bewertung. Unsicherheiten werden mithilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen modelliert und über eine Monte-Carlo-Simulation in der Bewertung berücksichtigt.

Schindler (2014) entwickelt eine Methodik zur Unterstützung produzierender Unternehmen bei der Auswahl einer unternehmensspezifischen Technologiekette im Zuge der strategischen Technologieplanung. Basierend auf der Definition der Technologiestrategie und einer Produktdefinition werden alternative Technologien identifiziert und einer Technologiegrobbeurteilung unterzogen. Diese Bewertung wird anhand der Kriterien Technologiereife, technische Machbarkeit sowie Technologiepotential durchgeführt. Aus den gefilterten Technologien können Technologiekettenalternativen generiert werden. Wirkzusammenhänge zwischen Technologien werden dabei berücksichtigt. Darauf aufbauend kann eine Technologiefinebewertung anhand der Kriterien Technologiereife, Wirtschaftlichkeit und Technologiepotential mit dem Ergebnis des Eignungsgrads der Technologiekettenalternativen stattfinden. Während die Modellierung der Unsicherheit für die quantitativen Kriterien mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen erfolgt, werden die qualitativen Kriterien mittels der Fuzzy-Logik über Histogramme der Zielgrößen abgebildet, die mittels einer Monte Carlo-Simulation berechnet werden (Reinhart & Schindler et al. 2011). Durch Interpretation des Histogramms der Technologieeignung kann eine Entscheidungsfindung erfolgen.

Joppen & Lipsmeier et al. (2019) entwickeln aufgrund auftretender Schwierigkeiten im Rahmen der Bewertung der Profitabilität von Investments in der Produktion einen Business-Case-Kalkulator. Ziel der Methodik ist die Schaffung von Transparenz bei Investment-Entscheidungen. Das Tool besteht dabei aus einer Workshop-Methode zur Sammlung von Daten entlang des Lebenszyklus. Im Workshop werden Aufwandskarten mit einer qualitativen Beschreibung der Kosten, der Auflistung der Einmalkosten sowie der Beschreibung der Entwicklungskosten aufgenommen und in einer gemeinsamen Liste mit möglichen Zukunftsszenarien konsolidiert. Darauf aufbauend findet eine Nutzenabschätzung statt. Dafür werden verschiedene Use Cases bspw. mittels

einer Prozesskarte oder Kreativitätstechniken identifiziert, individuell bewertet und potentielle Kombinationsmöglichkeiten zwischen Use Cases aufgezeigt. Zukünftige Erweiterungen von Investments können in diversen Berechnungsszenarios evaluiert werden. Implementierungsreihenfolgen werden nicht erstellt.

### 3.5 Defizite des aktuellen Stands der Forschung

Die vorgestellten Ansätze umfassen eine große Anzahl an Vorgehensweisen zur Strukturierung, Betrachtung von Wirkzusammenhängen und Bewertung der Digitalisierung bei produzierenden Unternehmen. Deren Erfüllung der in Kapitel 3.1 abgeleiteten Anforderungen an eine Methodik zur Entscheidungsunterstützung bei der Digitalisierung der Produktion von Unternehmen ist in Tabelle 3-1 dargestellt.

Die zugrundeliegenden Ausprägungen der Anforderungskriterien werden in Anhang A: Ausprägungen der Anforderungskriterien detailliert erläutert.

Die große Anzahl und Aktualität der vorgestellten Ansätze verdeutlichen den etablierten Einsatz von Vorgehensweisen in den Teilbereichen „Reifegradbewertung und Strukturierung von Lean- und Industrie 4.0-Methoden“ (siehe Kapitel 3.2), „Analyse von Wirkzusammenhängen in Produktionssystemen“ (siehe Kapitel 3.3) und „Bewertung von Produktionssystemen“ (siehe Kapitel 3.4) bei der Digitalisierung der Produktion.

Insbesondere im Bereich der Strukturierung befassen sich viele Ansätze mit der Bewertung des digitalen Reifegrads eines Unternehmens und der daraus resultierenden Ableitung von Handlungsalternativen. Bei der **Strukturierung von Lean- und Industrie 4.0-Methoden (FF 1.1)** ist festzustellen, dass sich viele Ansätze auf die Strukturierung von reinen Lean-Methoden-Toolboxen fokussieren (z. B. Schomburg (1980) und Merl (2016)). Weitere Ansätze entwickeln bestehende Lean-Methoden-Toolboxen um Aspekte der Industrie 4.0 weiter (z. B. Dombrowski & Richter (2018)). Viele aktuelle Ansätze fokussieren ausschließlich Industrie 4.0-Technologien, Anwendungsfälle und Methoden (z. B. Jodlbauer & Schagerl (2016) und Mittal & Kahn et al. (2019)). Die Ansätze von Dombrowski & Richter (2018), Nöhning & Wöstmann et al. (2018) und Siedler & Sadaune et al. (2019) zeigen Industrie 4.0-Handlungsalternativen auf, indem sie mit einer konkreten **Lean- und Industrie 4.0-Methoden-Toolbox verknüpft (FF 1.2)** sind. Viele der vorgestellten Ansätze erfüllen die definierte Anforderung nur in begrenztem Umfang, da die vorgeschlagenen Industrie 4.0-Technologien oder Ver-

Tabelle 3-1: Übersicht relevanter Forschungsansätze

Forschungsansätze mit Fokus auf:		Anforderungen:							
		1) Strukturierung von Lean- und Industrie 4.0-Methoden (FF 1.1)	2) Verknüpfung mit einer Lean- und Industrie 4.0-Methoden-Toolbox (FF 1.2)	3) Wirkzusammenhänge Lean- und Industrie 4.0-Methoden (FF 2.1)	4) Produktionsrelevante Zielgrößen (FF 2.2)	5) Strategische Bewertungsanforderungen bzgl. Industrie 4.0 (FF 3.1)	6) Modell- und Bewertungsanforderungen für monetäre und strategische Aspekte (FF 3.2)	7) Systematisches und transparentes Auswahlverfahren	8) Implementierungsreihenfolgen (FF 4)
Reifegradbewertung und Strukturierung von Lean- und Industrie 4.0-Methoden	Schomburg (1980)	●						●	
	Anderl & Picard et al. (2015)	●	●			●		●	●
	Bauernhansl (2016) <sup>a</sup>		●			●	●	●	●
	Greitemann (2016)	●				●			
	Jodlbauer & Schagerl (2016)	●	●	●		●			
	Merl (2016)	●				●		●	
	Merz (2016)					●	●		
	Seiter & Bayrle et al. (2016)	●	●			●		●	●
	Pessl & Sorko et al. (2017)		●			●	●	●	●
	Rößler & Haschemi (2017)		●			●	●	●	●
	Dombrowski & Krenkel et al. (2018)					●	●	●	●
	Dombrowski & Richter (2018) <sup>b</sup>	●	●	●		●	●	●	●
	Hanschke (2018)	●				●	●	●	●
	Lanza & Nyhuis (2018)	●	●			●	●	●	●
	Leineweber, Wienbruch et al. (2018) <sup>c</sup>	●		●		●	●	●	●
	Matt & Unterhofer et al. (2018)	●				●	●	●	●
Nöhring & Wöstmann et al. (2018)		●			●	●	●	●	
Schuh & Boos et al. (2018) <sup>d</sup>	●				●	●	●	●	
Hoellthaler & Braunreuther et al. (2019) <sup>e</sup>	●	●	●		●	●	●	●	
Mittal & Khan et al. (2019) <sup>f,g</sup>	●	●			●	●	●	●	
Siedler & Sadaune et al. (2019)	●	●			●	●	●	●	
Analyse von Wirkzusammenhängen in Produktionssystemen	Rivera & Chen (2007)					●	●	●	●
	Peter (2009)					●	●	●	●
	Al-Aomar (2011)					●	●	●	●
	Aull (2012)	●				●	●	●	●
	Jondral (2013)					●	●	●	●
	Dombrowski & Ebentreich et al. (2016)			●		●	●	●	●
	Stricker (2016)					●	●	●	●
	Michaeli (2017)					●	●	●	●
	Siedler & Langlotz et al. (2019) <sup>h</sup>	●	●	●		●	●	●	●
	Abdel-Kader & Dugdale (2001)					●	●	●	●
Bewertung von Produktionssystemen	Fiebig (2004)					●	●	●	●
	Krebs (2012)					●	●	●	●
	Schulze & Brieke et al. (2012) <sup>i</sup>					●	●	●	●
	Irrenhauser (2014)					●	●	●	●
	Schindler (2014)					●	●	●	●
	Joppen & Lipsmeier et al. (2019)					●	●	●	●

Veröffentlichungen, die Ergänzungen zu den genannten Ansätzen darstellen:

- a: Bildstein & Seidelmann (2014); b: Dombrowski & Richter et al. (2017); c: Morlock & Wienbruch et al. (2016); d: Schuh & Anderl et al. (2017); e: Hoellthaler & Weissenborn et al. (2018); f, g: Mittal & Romero et al. (2018a, 2018b); h: Langlotz & Aurich (2019); i: Brieke (2009)

besserungshebel knapp und sehr allgemein beschrieben werden sowie primär zur Ideengenerierung verwendet werden sollen (z. B. Anderl & Picard (2015), Seiter & Bayrle et al. (2016) und Mittal & Kahn et al. (2019)). Andere Ansätze erwähnen den Einsatz von „Industrie 4.0-Werkzeugkästen“ (z. B. Bildstein & Seidelmann (2014)). Wie umfangreich diese sind, wird in den Arbeiten nicht näher beschrieben. Unklar bleibt auch, in welchem Umfang konkrete Handlungsalternativen direkt aus den Reifegradmodellen bzw. den definierten Differenzen abgeleitet werden.

Die Anforderungen, **Wirkzusammenhänge und Zielgrößen** der Industrie 4.0-Methoden zu betrachten, werden von keinem der vorgestellten Ansätze vollständig erfüllt. **Wirkzusammenhänge zwischen Lean- und Industrie 4.0-Methoden (FF 2.1)** werden ausschließlich von Leineweber & Wienbruch et al. (2018) und Siedler & Langlotz et al. (2019) beachtet. Die technologischen und organisatorischen Wirkzusammenhänge mit Beschränkung auf Lean-Methoden werden wiederum nur von z. B. Aull (2012) und Jondral (2013) berücksichtigt. Ob die reifegradbasierten Ansätze indirekt und in begrenztem Umfang Beziehungen zwischen Industrie 4.0-Methoden betrachten, ist nicht eindeutig ersichtlich (z. B. Anderl & Picard et al. (2015)). Jodelbauer & Schagerl (2016) bemerken beispielsweise, dass die Dimensionen ihres Reifegradmodells aufeinander aufbauen. Wie genau einzelne Subkriterien miteinander verknüpft sind, wird allerdings nicht näher beschrieben. Die Anforderung, die Auswirkungen von Industrie 4.0-Methoden auf **produktionsrelevante Zielgrößen (FF 2.2)** zu berücksichtigen, wird bei einem Großteil der Ansätze berücksichtigt. Hervorzuheben sind dabei die Ansätze, die einzelne Industrie 4.0-Potentiale über eine definierte Kombinatorik mit einer detaillierten Kennzahlensystematik verknüpfen (z. B. Nöhring & Wöstmann et al. (2018), Schuh & Anderl et al. (2017), Dombrowski & Krenkel et al. (2018) und Hanschke (2018)). Wie genau die Kombinatorik abläuft, wird in den Arbeiten allerdings nicht näher beschrieben. Die Ansätze nach Merl (2016) und Stricker (2016) betrachten insbesondere die Zielgrößenwirkung von Methoden zur Prozessoptimierung.

Bei der **Bewertung von Produktionssystemen** ist festzustellen, dass aktuell keine geeignete Methodik zur Bewertung von Risiken und Potentialen von Industrie 4.0-Methoden existiert, um daraus eine Handlungsempfehlung für Entscheidungsträger ableiten zu können. Oftmals wird die Unternehmensstrategie im Bewertungsprozess nicht berücksichtigt (z. B. Fiebig (2004), Brieke (2009)). **Strategische Bewertungsanforderungen durch Industrie 4.0 (FF 3.1)**, die monetär nicht erfasst werden können, müssen aufgrund ihrer Relevanz dennoch in der Entscheidungsfindung beachtet werden.

Die Verwendung eines Industrie 4.0-spezifischen Kriterienkatalogs ist dabei wichtig, um eine systematische und umfassende Bewertung der strategischen Nutzenpotentiale durchführen zu können. Viele Ansätze aus dem Bereich Strukturierung (z. B. Hanschke (2018)) fokussieren strategische Nutzenpotentiale, ohne diese weiter zu detaillieren. Außerdem werden weitere **Modell- und Bewertungsanforderungen für die monetären und strategischen Aspekte (FF 3.2)** gestellt. Die monetäre Bewertung soll einmalige und laufende Zahlungen erfassen sowie diese zu einer monetären Zielgröße aggregieren. Dabei auftretende Unsicherheiten werden mithilfe einer Unsicherheitsmodellierung erfasst und in die Entscheidungsgrundlage integriert (z. B. Schindler (2014) und Irrenhauser (2014)). Wirft man einen detaillierteren Blick auf die vorgestellten Ansätze, so lassen sich einige Unterschiede hinsichtlich der Verrechnung quantitativer Kriterien erkennen. Diese werden entweder monetarisiert (z. B. Krebs (2012) und Seiter & Bayrle et al. (2016)) oder fließen zusammen mit den qualitativen Kriterien in die nicht-monetäre Bewertung ein. Während einige Ansätze die qualitativen Kriterien als strategischen Nutzen auffassen (z. B. Schindler (2014)), interpretieren andere diese Kriterien als einen intangiblen Zusatznutzen, der nur eine Art Zusatzinformation darstellt und somit keine große Bedeutung für die Entscheidungsfindung hat. Die Anforderung, Industrie 4.0-Potentiale begründet bzw. eindeutig zu priorisieren, indem ein **systematisches und transparentes Auswahlverfahren** verwendet wird, wird mit Bezug auf Industrie 4.0 nur von Dombrowski & Krenkel et al. (2018) erfüllt. Zwar beschreiben fast alle untersuchten Ansätze Verfahren zur Aufwand-Nutzen-Bewertung und nennen die Einordnung der Potentiale in eine Portfolio-Matrix. Allerdings werden keine Informationen über die Bewertungskriterien genannt, um den Nutzen oder den Aufwand zur Umsetzung einer Methode zu quantifizieren. Des Weiteren werden keine Informationen zu verwendeten methodischen Ansätzen bereitgestellt. Bezüglich Lean-Methoden ist diese Anforderung erfüllt (z. B. Jondral (2013)).

Auch bei der Anforderung, **Implementierungsreihenfolgen (FF 4)** zu entwickeln, ist eine Unterscheidung zwischen Ansätzen zu Industrie 4.0 und Lean-Management zu treffen. Bei den Lean-Methoden sind weit fortgeschrittene Vorgehen zur Methodenauswahl vorhanden, die häufig durch eine Simulation im Bereich der Wertstromanalyse in Kombination mit Optimierungsalgorithmen unterstützt werden (z. B. Peter (2009)). Dabei werden neben der Auswahl keine konkreten Untersuchungen hinsichtlich des Implementierungsprozesses angestellt. Einzig die Arbeiten von Rivera (2007) und Aull

(2012) beschäftigen sich mit dem zeitlichen Aspekt der Implementierung und der Ableitung konkreter Implementierungsreihenfolgen. Die Arbeit von Aull (2012) stellt hierbei ein Grundgerüst dar, das für die Untersuchung von Implementierungsreihenfolgen auf Industrie 4.0-Methoden übertragen werden kann. Im Bereich der Einführungsstrategien von Industrie 4.0-Methoden nutzen viele Ansätze eine unternehmensbezogene Herangehensweise (z. B. Anderl & Picard (2015)), bei der das spezifische Produktionssystem des zu untersuchenden Unternehmens im Zentrum steht. Diese Ansätze können als problemorientierte Handlungsweise interpretiert werden, die nur bedingt eine allgemeingültige Methodenauswahl ermöglicht. Die Arbeiten von Seiter & Bayrle et al. (2016) und Hanschke (2018) sind hier hervorzuheben, da in dem beschriebenen Prozess eine detaillierte Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung integriert ist und die Unternehmen bei der Einführung durch eine Roadmap unterstützt werden, die den zeitlichen Aspekt durch Schätzungen integriert. Im Rahmen der Bewertung findet bei den meisten untersuchten Ansätzen auch eine Priorisierung der Methoden hinsichtlich ihrer Implementierung statt. Dabei werden die Methoden in den meisten Fällen nach ihrem Aufwand und Nutzen priorisiert (z. B. Schuh & Boos et al. (2018)).

Basierend auf den vorangegangenen Ausführungen ist festzustellen, dass geeignete Strukturierungsprinzipien, welche eine Übersicht über Methoden und Basistechnologien der Industrie 4.0 sowie deren Verknüpfung mit einer geeigneten Methoden-Toolbox bieten, nicht umfassend berücksichtigt werden. Außerdem fehlt ein Ansatz, welcher Wirkzusammenhänge von Industrie 4.0-Methoden darstellt. Zusätzlich ist ein Bewertungsansatz, der strategische und monetäre Aspekte im Bereich Industrie 4.0 ausreichend betrachtet, nicht vorhanden. Für jede Anforderung separat betrachtet, gibt es Ansätze, die die spezifische Anforderung für Lean oder Industrie 4.0 umfassend erfüllt. Insgesamt fehlt aber ein Ansatz zur Erfassung der Potentiale von Lean und Industrie 4.0, der eine kombinierte Bewertung unter Berücksichtigung der Unternehmensziele und der Implementierungsreihenfolge erlaubt und die geforderten Anforderungen umfassend über alle Bereiche abdeckt. Daher wird im Folgenden eine Methodik entwickelt, welche den gestellten Anforderungen entspricht.

## 4 Lösungsansatz

Die Defizite im aktuellen Stand der Forschung bei Strukturierungsprinzipien, Wirkzusammenhängen und der Bewertung von Industrie 4.0-Methoden in der Produktion bilden die Ausgangssituation der nachfolgenden Methodik. Ziel ist die Entwicklung einer Methodik zur Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz in der Produktion. Dieses Kapitel beschreibt den zur Erfüllung der Zielsetzung erstellten Lösungsansatz (siehe Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Allgemeiner Lösungsansatz

Wie in den vorherigen Kapiteln erläutert, sind Industrie 4.0-Methoden nicht unangepasst von technologieführenden Unternehmen auf die Bedingungen und Anforderungen von anderen Unternehmen übertragbar. Dies liegt darin begründet, dass die Wirkzusammenhänge der eingesetzten Methoden von den Systemmerkmalen, wie beispielsweise unterschiedlichen Betriebstypologien oder Größen, abhängig sind. Vor allem können sich KMUs die Einführung dieser Methoden meist nur dann leisten, wenn im Vorfeld einer Einführung sichergestellt wird, dass diese dem Unternehmen einen wirtschaftlichen Nutzen bringen und ihre Potentiale ausgeschöpft werden können. Jedoch steht normalerweise keine Vorhersage zur Verfügung, wie sich die Einführung von Industrie 4.0-Methoden auf Zielgrößen des betrachteten Systems und somit schlussendlich auf ein Gesamtsystem auswirken.

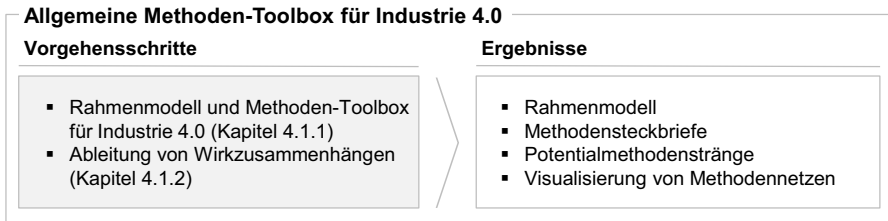


Diese Vorhersagemöglichkeit soll durch die erarbeitete Methodik in der vorliegenden Arbeit geschaffen werden. Dafür wird zunächst eine allgemeine Methoden-Toolbox für Industrie 4.0 vorgestellt (siehe Kapitel 4.1). Dies umfasst die Grobstrukturierung von Industrie 4.0-Methoden mittels eines Rahmenmodells. Jede Industrie 4.0-Methode wird durch einen Methodensteckbrief klar abgegrenzt. Durch Literaturrecherche und Experteninterviews mit Unternehmensvertretern werden Modellierungsparameter für die Methodik verifiziert und Wirkzusammenhänge abgeleitet. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden drei Phasen innerhalb der Methodik durchlaufen. In Phase 1 werden relevante Methoden anhand betriebstypologischer Merkmale eingegrenzt. Das Ergebnis sind Potentialmethodenstränge je definierter Produktionstypologie (siehe Kapitel 4.2). In Phase 2 werden die eingegrenzten Stränge auf Methodenebene hinsichtlich strategischer Zielgrößen und des monetären Aufwands bewertet und Einführungsszenarien mit priorisierten Potentialmethodensträngen abgeleitet (siehe Kapitel 4.3). Basierend auf diesen Einführungsszenarien werden in Phase 3 simulativ Implementierungsreihenfolgen abgeleitet und eine empfohlene Industrie 4.0-Roadmap vorgeschlagen (siehe Kapitel 4.4).

Die Bewertungsmethodik wird in Kapitel 5 anhand eines Praxisbeispiels demonstriert. In Kapitel 6 werden abschließend der Nutzen und die Grenzen der Methodik kritisch diskutiert.

## **4.1 Allgemeine Methoden-Toolbox für Industrie 4.0**

Ziel von Kapitel 4.1 ist es, eine allgemeine Methoden-Toolbox für Produktionsunternehmen zu erstellen. Dazu wird ein Rahmenmodell für Industrie 4.0 entwickelt, welches Industrie 4.0-Methoden vorstrukturiert. Anschließend werden dazugehörige Methodensteckbriefe ausgearbeitet und Wirkzusammenhänge durch Experteninterviews und eine Literaturrecherche abgeleitet. Die Kernelemente dieses Kapitels sind in Abbildung 4-2 dargestellt.



*Abbildung 4-2: Vorgehen und Ergebnisse von Kapitel 4.1*

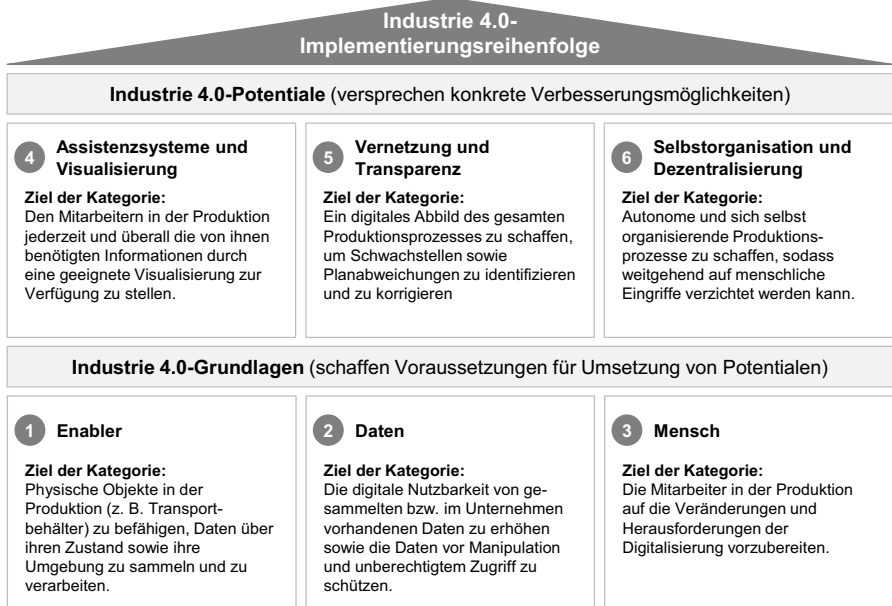
Im vorliegenden Kapitel wird die allgemeine Methoden-Toolbox für Industrie 4.0 in Anlehnung an die vom Autor angeleiteten studentischen Arbeiten A\_Adler (2019), A\_Krodel (2019), A\_Rinnewitz (2019), A\_Schaumann (2019), A\_Böhn (2018), A\_Krogmann (2018) und A\_Steck (2018) vorgestellt.

#### **4.1.1 Rahmenmodell und Methoden-Toolbox für Industrie 4.0**

Ein Kernelement im Rahmen der Methodik ist die Methoden-Toolbox zur Sammlung und Aufbereitung von Industrie 4.0-Methoden. Die Methoden-Toolbox hat das Ziel, eine große Anzahl von ausgearbeiteten Industrie 4.0-Methoden strukturiert darzustellen. Grundlage bilden bereits bekannte Best-Practice-Anwendungen aus Forschung und Praxis, die im Rahmen einer Literaturrecherche zusammengestellt werden. Zusätzlich dienen die Zusammenarbeit mit Industriepartnern und unter realen Produktionsbedingungen erprobte Lösungsansätze als Basis. Insgesamt können so 60 Industrie 4.0-Methoden identifiziert und detailliert ausgearbeitet werden. Darüber hinaus ist die Methoden-Toolbox erweiterbar. (Liebrecht & Krogmann et al. 2019; Liebrecht & Hübner 2018a)

Die Methoden-Toolbox besteht aus einem Rahmenmodell und den ausgearbeiteten Methodensteckbriefen, welche den einzelnen Kategorien des Rahmenmodells zugeordnet sind. Die Darstellung in Form eines Rahmenmodells ist notwendig, um einen strukturierten Überblick über die funktionale Wirkung von Industrie 4.0-Methoden zu schaffen und auf technologische sowie organisatorische Zusammenhänge zwischen den Methoden hinzuweisen. Als Darstellungsform wird dazu in Anlehnung an Liebrecht & Krogmann et al. (2019) und Liebrecht & Schaumann et al. (2018) ein Säulenmodell gewählt. Eine hierarchische Darstellung eignet sich, da die Methoden-Toolbox sowohl grundlegende Industrie 4.0-Methoden als auch weiterführende bzw. übergeordnete Industrie 4.0-Potentiale enthält, welche auf den grundlegenden Methoden aufbauen. Die

Strukturierung wird an dieser Stelle allerdings nicht auf Methodenebene betrachtet, sondern auf Basis definierter Methodenkategorien. Diese Kategorien bilden allgemeine Funktionsbereiche, denen die einzelnen Methoden aufgrund ihrer ähnlichen operativen bzw. funktionalen Wirkung zugeordnet werden (Bischoff & Taphorn et al. 2015). Basierend auf einer Literaturrecherche werden sechs Methodenkategorien definiert. Diese Kategorien bilden das in Abbildung 4-3 dargestellte Rahmenmodell.



*Abbildung 4-3: Rahmenmodell – Industrie 4.0-Methodenkategorien und Ziele (in Anlehnung an (Liebrecht & Krogmann et al. 2019; Liebrecht & Schaumann et al. 2018; Obermaier 2017; Jodlbauer & Schagerl 2016; Siepmann 2016; Bischoff & Taphorn et al. 2015; Lichtblau & Stich et al. 2015))*

Den ersten Bereich bilden die drei Kategorien „Enabler“, „Daten“ und „Mensch“. Sie stellen die Basis bzw. das Fundament des Rahmenmodells dar und schaffen die notwendigen Grundlagen, damit Industrie 4.0 in einem Unternehmen umgesetzt bzw. eingeführt werden kann. Methoden, die diesen Kategorien zugeordnet werden, werden deshalb im Folgenden auch als **Grundlagenmethoden** bezeichnet. Die Kategorien „Assistenzsysteme und Visualisierung“, „Vernetzung und Transparenz“ sowie „Selbstorganisation und Dezentralisierung“ bauen auf diesen Industrie 4.0-Grundlagen auf.

Methoden, die diesen Kategorien zugeordnet werden, stellen Industrie 4.0-Potentiale dar, die zu konkreten Verbesserungen wie beispielsweise Durchlaufzeitoptimierungen oder der Reduzierung von Fehlern führen. Sie werden deshalb im Folgenden als **Potentialmethoden** bezeichnet. Den letzten Bereich bildet das Dach des Rahmenmodells. Dieses repräsentiert das übergeordnete Ziel der Methodik, ein Unternehmen bei der Entwicklung einer spezifischen Industrie 4.0-Implementierungsreihenfolge zu unterstützen, indem geeignete Industrie 4.0-Potentiale vorgeschlagen und ausgewählt werden. (A\_Krogmann 2018)

Die sechs Kategorien sind angelehnt an die Rahmenmodelle von Obermaier (2017), Jodlbauer & Schagerl (2016), Siepmann (2016), Bischoff & Schagerl et al. (2015) sowie Lichtblau & Stich et al. (2015) und werden nachfolgend einzeln vorgestellt:

#### **Kategorie „Enabler“ (Grundlagen)**

Die Kategorie „Enabler“ berücksichtigt alle Methoden, welche die Bereitstellung umfangreicher Informationen über die Umgebung und den Zustand von physischen Objekten in der Produktion ermöglichen. Hierzu werden die Objekte mit IKT-Komponenten ausgestattet. Das Ziel der Kategorie ist es, physische Objekte in der Produktion (z. B. Transportbehälter) zu befähigen, Daten über ihren Zustand sowie ihre Umgebung zu sammeln und zu verarbeiten. (Liebrecht & Hübner 2018a)

#### **Kategorie „Daten“ (Grundlagen)**

In der Kategorie „Daten“ sind alle Methoden enthalten, die Unternehmen befähigen, große Datenmengen zu speichern, zu verarbeiten und sicher dem richtigen Empfänger zu übermitteln. Außerdem werden Methoden, die die digitale Erfassung von bisher analog vorliegenden Informationen ermöglichen, dieser Kategorie zugeordnet. Das Ziel der Kategorie ist es, die digitale Nutzbarkeit von gesammelten bzw. im Unternehmen vorhandenen Daten zu erhöhen sowie die Daten vor Manipulation und unberechtigtem Zugriff zu schützen. (Liebrecht & Hübner 2018a)

#### **Kategorie „Mensch“ (Grundlagen)**

Die Kategorie „Mensch“ fasst alle Methoden zusammen, welche die Mitarbeiter durch Schulungs- und Weiterbildungsmaßnahmen auf den Wandel ihres Arbeitsumfelds einstellen, den Aufbau notwendiger Kompetenzen und Qualifikationen fördern sowie die Bereitschaft erhöhen, Veränderungsprojekte mitzugestalten. Das Ziel der Kategorie ist es, die Mitarbeiter in der Produktion auf die Veränderungen und Herausforderungen der Digitalisierung vorzubereiten. (Liebrecht & Hübner 2018a)

**Kategorie „Assistenzsysteme und Visualisierung“ (Potentiale)**

Die Kategorie „Assistenzsysteme und Visualisierung“ gruppiert Methoden, die z. B. Arbeitsanweisungen digital visualisieren, digitale Auftrags-, Maschinen- oder Anlageninformationen bereitstellen sowie die elektronische Kommunikation zwischen den Beschäftigten in der Produktion ermöglichen. Das Ziel der Kategorie ist es, den Mitarbeitern in der Produktion jederzeit und überall die von ihnen benötigten Informationen durch eine geeignete Visualisierung zur Verfügung zu stellen. (Liebrecht & Hübner 2018a)

**Kategorie „Vernetzung und Transparenz“ (Potentiale)**

In der Kategorie „Vernetzung und Transparenz“ werden Methoden zusammengefasst, welche die Nutzung von Simulationssystemen fokussieren und die Schaffung von digitalen Qualitäts- bzw. Versorgungsregelkreisen bewirken. Das Ziel der Kategorie ist es, ein digitales Abbild des gesamten Produktionsprozesses zu schaffen, um Schwachstellen sowie Planabweichungen zu identifizieren und zu beheben. (Liebrecht & Hübner 2018a)

**Kategorie „Selbstorganisation und Dezentralisierung“ (Potentiale)**

Die Kategorie „Selbstorganisation und Dezentralisierung“ enthält alle Methoden, die die Schaffung einer autonomen Kapazitäts- und Ressourcenplanung, die Umsetzung intelligenter Maschinen- und Anlagensteuerungen sowie die Nutzung einer dezentralen Prozesssteuerung fokussieren. Ziel der Kategorie ist es, autonome und sich dezentral selbstorganisierende Produktionsprozesse zu schaffen, sodass weitgehend auf menschliche Eingriffe verzichtet werden kann. (Liebrecht & Hübner 2018a)

Aufbauend auf den dargestellten Zielen werden die 60 Industrie 4.0-Methoden jeweils einer Kategorie zugewiesen. Abbildung 4-4 stellt die Zuordnung der Methoden zur Kategorisierung dar.

Zuordnung der Methoden zu den Kategorien		Zugeordnete Industrie 4.0-Methoden	
Methoden-kategorie			
<b>1</b> <b>Enabler</b> (8 Methoden)	<b>ESIN</b>	Eindeutige und sichere Identitätsnachweise für Produkte, Prozesse und Maschinen	<b>HKP</b> Homogenisierung von Kommunikationsprotokollen
	<b>ECS</b>	Einsatz cyber-physischer Systeme bzw. Ausstatten von Objekten mit Kleinstcomputern	<b>IPA</b> Integration bestehender Produktionsanlagen
	<b>EPD</b>	Erfassung von Prozessdaten (u. a.) durch Maschinen und Werkzeuge	<b>IDE</b> Intelligente Datenerhebung
			<b>OID</b> Objektkennung <b>ZKN</b> Zukunftsfähige Kommunikationsnetzwerke
<b>2</b> <b>Daten</b> (13 Methoden)	<b>BIF</b>	Bedarfsgerechte Information durch Filterung	<b>DITS</b> Durchgängigkeit von IT-Systemen
	<b>CSD</b>	Cyberschutz von gespeicherten Daten bzw. Organisatorische und kommunikative IT-Sicherheit	<b>EDAI</b> Erstellung digitaler Anlageninformationen
	<b>DSAS</b>	Data Security von Anlagen/ Systemen bzw. Technische IT-Sicherheit	<b>EDAA</b> Erstellung digitaler Arbeitsanweisungen
	<b>DDK</b>	Datenaufnahme, Design und Klassifizierung	<b>EDWI</b> Erstellung digitaler Werkzeuginformationen
	<b>DPEP</b>	Digitalisierung der Personaleinsatzplanung	<b>VDPD</b> Verfügbarkeit digitaler Produktionsdaten
			<b>VED</b> Verfügbarkeit von Echtzeitdaten <b>ZRL</b> Zentrale Rechenleistung <b>ZVD</b> Zentrale Verfügbarkeit bzw. Verwaltung von Daten
<b>3</b> <b>Mensch</b> (4 Methoden)	<b>AUW</b>	Aus- und Weiterbildung	<b>EKP</b> Erarbeiten von Kompetenzprofilen
	<b>CM</b>	Change-Management	
	<b>DSDM</b>	Digitale Skillmatrix und Digitale Mitarbeiterzuordnung	
<b>4</b> <b>Assistenzsysteme und Visualisierung</b> (11 Methoden)	<b>AV</b>	Auftragsvisualisierung	<b>IKMM</b> Intelligente Kommunikation zwischen Mitarbeitern und Maschinen
	<b>DVMZ</b>	Digitale Visualisierung von Maschinenzuständen	<b>PF</b> Papierlose Fertigung
	<b>DWI</b>	Digitale Wartungsinformationen per AR	<b>PDMA</b> Produktionsdaten per mobiler App
	<b>EF</b>	Echtzeitfeedback	<b>VIPA</b> Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen/ Werkzeugen
	<b>FDP</b>	Führen durch den Prozess	<b>VPQS</b> Visuelle In-Process-QS
	<b>IAEP</b>	Integrierter Änderungsprozess	
<b>5</b> <b>Vernetzung und Transparenz</b> (16 Methoden)	<b>BVPA</b>	Bedarfsgerechte Versorgung von Produktionsanlagen	<b>IPSL</b> Intelligente Produktionssteuerung und Lagerhaltung
	<b>DFPA</b>	Digitale Ferndiagnose von Produktionsanlagen	<b>IRV</b> Intelligente Routen durch Vernetzung
	<b>DKZM</b>	Digitale Kommunikation zwischen Mitarbeitern	<b>ISTP</b> Intelligente standortübergreifende Transportprozesse
	<b>DLDF</b>	Digitale Layoutplanung und Digitales Fabrikmodell	<b>LWA</b> Live-Wertstromanalyse
	<b>DSM</b>	Digitales Shopfloor Management	<b>LTR</b> Lokalisierung und Tracking von Ressourcen
	<b>IAUD</b>	Intelligente Anlagenüberwachung und -diagnose	<b>PM</b> Predictive Maintenance
	<b>IB</b>	Intelligente Behälter	<b>SVP</b> Simulation mit virtuellen Prototypen/ Prozessen
	<b>IP</b>	Intelligente Palette	<b>VAP</b> Virtuelles Abbild der Produktion
<b>6</b> <b>Selbstorganisation und Dezentralisierung</b> (8 Methoden)	<b>APOP</b>	Automatische Planung und Optimierung der Produktion	<b>IW</b> Intelligente Werkstücke
	<b>ATF</b>	Autonome Transportfahrzeuge	<b>SKFP</b> Selbstkonfigurierung von Produktionsanlagen
	<b>FLPS</b>	Flexibilisierung von Produktionssystemen bzw. Plug & Produce	<b>SKRP</b> Selbstkorrektur von Produktionsanlagen
	<b>IPEP</b>	Intelligente Personaleinsatzplanung	<b>SOP</b> Selbstorganisierte Produktion

Abbildung 4-4: Methoden-Toolbox – Zuordnung der Industrie 4.0-Methoden zu den gebildeten Kategorien (in Anlehnung an (Liebrecht & Krogmann et al. 2019))

Es werden 35 Methoden in die Kategorien „Assistenzsysteme und Visualisierung“, „Vernetzung und Transparenz“ und „Selbstorganisation und Dezentralisierung“ eingeordnet. 25 Methoden werden den Kategorien „Enabler“, „Daten“ und „Mensch“ zugeordnet. Einerseits versprechen hauptsächlich die Potentialmethoden Verbesserungsmöglichkeiten, sodass sich die Auswahlentscheidungen auf die 35 identifizierten Potentialmethoden fokussieren sollten. Andererseits sind die Potentialmethoden in einem Unternehmen nur einführbar, wenn die notwendigen Voraussetzungen für deren Umsetzung erbracht werden. Die Potential- und Grundlagenmethoden stehen also in direkter Beziehung zueinander. Da diese Abhängigkeiten von den Eigenschaften der jeweiligen Potentialmethode abhängen und somit methodenspezifisch sind, ist eine generelle Betrachtung der Zusammenhänge auf Basis der definierten Methodenkategorien nicht ausreichend. (Liebrecht & Krogmann et al. 2019)

Daher wird in Kapitel 4.1.2 eine genaue Analyse der Wirkzusammenhänge, Aufwände und Zielgrößen auf der Ebene einzelner Methoden durchgeführt, um eine detaillierte Datengrundlage abzuleiten.

Als zentrale Quelle zur Aufbereitung und Speicherung des vorhandenen Methodenwissens wird eine Datenbank verwendet, welche detaillierte Information über die definierten Industrie 4.0-Methoden enthält. Dieses Wissen kann in Form von Methodensteckbriefen visualisiert werden. Für jede der in Abbildung 4-4 genannten Methoden kann somit ein allgemeingültiger Methodensteckbrief erstellt werden, der die benötigten Informationen verständlich und übersichtlich aufbereitet. Der entwickelte Methodensteckbrief ist anhand einer beispielhaft ausgewählten Methode in Abbildung 4-5 dargestellt. Die wichtigsten Inhalte der Datenbank für die genannten 60 Methoden sind in Anhang B: Methodensteckbriefe dokumentiert.

# Papierlose Fertigung

<b>Kategorie</b> Assistenzsysteme und Visualisierung	
<b>Beispielbild</b>  <p style="text-align: center;">© era-contact GmbH</p>	
<b>Beschreibung</b> Die Papierlose Fertigung bezeichnet die Bereitstellung aller arbeitsrelevanter Dokumente und Daten in digitaler Form, auf Bildschirmen oder mobilen Endgeräten am Arbeitsplatz. Mit der Abschaffung von papierbezogenen Informationen existiert nur noch eine relevante, zentrale Datenquelle (Single Source of Truth). Diese garantiert die Aktualität von Maschinen- und Prozessdaten und ermöglicht ein digitales Abbild der Fertigung. Dabei wird die Echtzeitfähigkeit vorausgesetzt und einheitliche sind Datenformate gegeben.	
<b>Ziele</b> Kosten <input type="radio"/>	<b>Potentiale</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ressourcenoptimierung</li> <li>▪ Vermeidung von Verwechslungen</li> <li>▪ Bereitstellung umfangreicher Informationen</li> </ul>
Zeit <input type="radio"/>	<b>Tech. Voraussetzungen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mobiles Endgerät</li> <li>▪ Cloud</li> <li>▪ IT Datensicherheit</li> </ul>
Qualität <input type="radio"/>	<b>Orga. Voraussetzungen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ IT-Systemkenntnis</li> <li>▪ Digitale Arbeitsanweisungen vorhanden</li> <li>▪ Standardisierte Arbeit</li> </ul>
Mitarbeiter <input type="radio"/>	<b>Aufbauende 14.0-Methoden</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auftragsvisualisierung</li> <li>▪ Integrierter Änderungsprozess</li> <li>▪ Intelligente Werkstücke</li> </ul>
Flexibilität <input type="radio"/>	<b>Vorangehende 14.0-Methoden</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Data Security von Anlagen/Systemen bzw. Techn. IT-Sicherheit</li> <li>▪ Durchgängigkeit von IT-Systemen</li> <li>▪ Erstellung digitaler Arbeitsanweisungen</li> </ul>
TRG 3 / 3	
Aufwand 2 / 4	
<b>Umsetzungsgrad</b>	
0 %	Arbeitsrelevante Dokumente und Daten sind bisher nicht ausreichend digital erfasst, sodass Informationen in Papierform bereitgestellt werden. Die herkömmliche Weise der Informationsbereitstellung und -verarbeitung wird genutzt. Im Rahmen von Änderungsprozessen werden Dokumente aufwändig getauscht und ersetzt.
25 %	Der Einsatz der papierlosen Fertigung ist geplant, sodass Maßnahmen zur Vorbereitung und Einführung erarbeitet werden. Erste Voraussetzungen wie die Ausstattung von Arbeitsplätzen mit Bildschirmen oder Computern sind geschaffen. Konzepte für eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche werden erarbeitet.
50 %	Ein skalierbares Konzept für die papierlose Fertigung ist definiert und wurde mit Hilfe von Prototypen validiert. Erste Anwendungsfälle in der Produktion werden geschaffen. Die Übergangsphase, in der arbeitsrelevante Dokumente sowohl in Papierform als auch digital zur Verfügung stehen, beginnt.
75 %	Die papierlose Fertigung wird flächendeckend umgesetzt. Die Bereitstellung aller arbeitsrelevanter Dokumente und Daten in digitaler Form ist gegeben. Informationen werden automatisch und prozessbegleitend dokumentiert, sodass sie für Revisionsfälle oder automatische Datenauswertungen genutzt werden können.
100 %	Optimaler Einsatz der papierlosen Fertigung. Alle Dokumente der Produktion sind nur digital vorhanden. Zu den Daten ist ein allgemeiner Zugang von überall möglich. Daten generieren sich selbstständig und in Echtzeit. Erweiterungen mit neuen Inhalten und Funktionen (z.B. Videoanweisungen) sind geplant und werden realisiert.

Abbildung 4-5: Beispielhafter Methodensteckbrief (in Anlehnung an (Liebrecht & Krogmann et al. 2019; Liebrecht & Schaumann et al. 2018))



Die Methodensteckbriefe stellen neben allgemeinen Angaben wie Bezeichnung, Beschreibung, Kategorie sowie einer Übersicht zu Anwendungspotentialen und -risiken Informationen über die funktionale und strategische Methodenauswirkung bereit (Liebrecht & Krogmann et al. 2019). Wie stark die Umsetzung einer Methode sich auf die strategischen Produktionsziele „Kosten“, „Zeit“, „Qualität“, „Mitarbeiter“ und „Flexibilität“ auswirkt, wird durch Harvey Balls visualisiert (Liebrecht & Krogmann et al. 2019). Neben strategischen Zielgrößen werden zusätzlich noch die Aufwände, die bei einer Methodeneinführung entstehen, und der technologische Reifegrad (TRG) dargestellt. Die genannten Modellierungsparameter werden detailliert in Kapitel 4.4.1 vorgestellt. Dieses Verständnis ermöglicht es, solche Industrie 4.0-Methoden zu priorisieren und auszuwählen, die besonders geeignet erscheinen, spezifische Herausforderungen innerhalb eines Unternehmens zu lösen. Das Zielsystem bildet die Grundlage für eine Analyse der Auswirkung einzelner Industrie 4.0-Methoden auf die Produktionsziele.

Für die Umsetzung von Industrie 4.0 müssen verschiedene Lösungsbausteine kombiniert werden. Dabei entstehen Beziehungen bzw. Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Methoden (Siepmann 2016). Deshalb enthält der Steckbrief außerdem Informationen über vorangehende Methoden, die vor der Einführung der fokussierten Methode umgesetzt werden müssen. Des Weiteren werden übergeordnete Methoden genannt, welche auf der im Steckbrief beschriebenen Methode aufbauen. (Liebrecht & Krogmann et al. 2019)

Aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen von anwendenden Unternehmen kann es vorkommen, dass bereits verschiedene Industrie 4.0-Methoden in unterschiedlichem Umfang umgesetzt sind. Um dies zu berücksichtigen, werden konkrete Ausprägungsstufen definiert, mit deren Hilfe der Umsetzungsgrad der Methode zu Beginn der Bewertung im Unternehmen gezielt aufgenommen werden kann. (Liebrecht & Krogmann et al. 2019)

#### **4.1.2 Ableitung von Wirkzusammenhängen**

Um dem Anspruch einer allgemein anwendbaren Methodik gerecht zu werden, ist es notwendig, die voraussetzenden und unterstützenden Beziehungen sowie Zielgrößen möglichst allgemeingültig zu definieren.

## Methodenbeziehungen und Methodenstrang

Industrie 4.0-Methoden können untereinander in Beziehungen stehen. Methodenbeziehungen stellen die Wirkzusammenhänge dar, welche zwischen zwei Methoden bestehen. Unterschieden wird dabei zwischen voraussetzenden und unterstützenden Beziehungen. Hat eine Methode voraussetzende Methoden, müssen diese erst bis zu einem definierten Schwellwert (z. B. Umsetzungsgrad > 75 %) umgesetzt werden, bevor die Methode selbst eingeführt werden kann. Hat eine Methode unterstützende Methoden, vereinfachen diese die Einführung der Methode (siehe Abbildung 4-6).

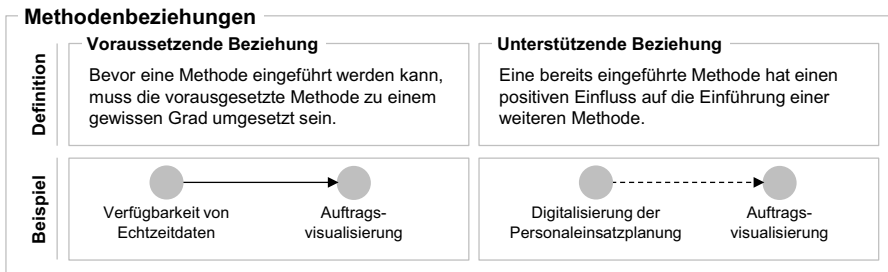


Abbildung 4-6: Arten der Beziehungen zwischen Industrie 4.0-Methoden

Methodenstränge ergeben sich aus einzelnen Methoden, die durch Wirkzusammenhänge verbunden sind (siehe Abbildung 4-7). Die Gesamtheit aller Methodenstränge ergibt ein Methodennetz. Jede Industrie 4.0-Methode wird als Knoten im Methodennetz dargestellt. Ein Methodenstrang setzt sich aus einer oder mehreren Methoden zusammen. Die Zusammensetzung ist abhängig von definierten Wirkzusammenhängen zwischen Methoden. Ein Methodenstrang trägt den Namen der zuletzt einzuführenden Methode, da die Einführung der selbigen angestrebt wird, häufig der Meilenstein des Gesamtkonzeptes der Industrie 4.0-Implementierungsreihenfolge. Dafür müssen die identifizierten Interdependenzen betrachtet werden, um voraussetzende Beziehungen zu identifizieren. Ein Methodenstrang hat im Allgemeinen eine Potentialmethode als Ziel und wird zur eindeutigen Abgrenzung im Folgenden Potentialmethodenstrang genannt.

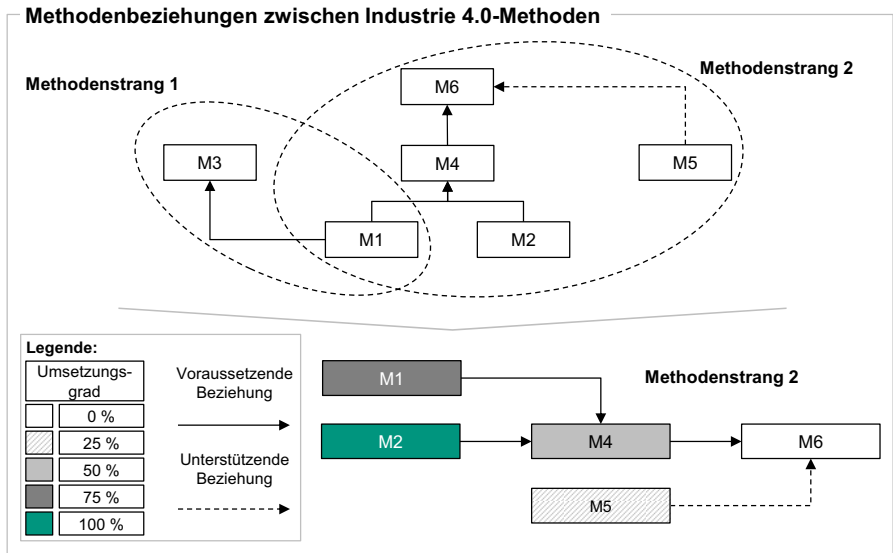


Abbildung 4-7: Methodenbeziehungen und Methodenstrang (in Anlehnung an (A\_Stentzel 2018))

### Implementierungsreihenfolge

Implementierungsreihenfolgen umfassen die zeitliche Komponente bei der Einführung von Industrie 4.0-Methoden. Diese besteht aus den Implementierungsdauern der Methoden und der zeitlichen Abfolge der Methodenimplementierungen, bedingt durch die Wirkzusammenhänge. Eine Industrie 4.0-Roadmap stellt den Plan zur Einführung von Industrie 4.0 im Unternehmen dar. Sie setzt sich aus der unternehmensspezifischen Implementierungsreihenfolge der ausgewählten Industrie 4.0-Methoden zusammen und beinhaltet die zeitliche Planung der Implementierung.

### Investitionsalternative für Industrie 4.0

Investitionsalternativen können Potentialmethodenstränge, eine beliebige Kombination von Methoden oder eine einzelne Methode sein und werden in der Anwendung definiert, z. B. eine Menge von Grundlagenmethoden. Sie stellen einen Ausschnitt aus dem Methodennetz dar, d. h. jeder Methodenstrang stellt eine Investitionsalternative dar, aber nicht alle Investitionsalternativen müssen dem Methodenstrang einer Potentialmethode entsprechen. Eine Investitionsalternative kann immer vollständig implementiert

werden, da alle nötigen Voraussetzungen enthalten sind. Die Vielseitigkeit bei der Bildung von Investitionsalternativen bietet die Möglichkeit, verschiedene Einführungszenarien zu bewerten, um eine strategisch und monetär an das Unternehmen angepasste Implementierungsreihenfolge von Industrie 4.0-Methoden zu ermitteln.

### Erarbeitung der Datengrundlage der Methoden-Toolbox

Abbildung 4-8 stellt das Vorgehen zur Erstellung der Datengrundlage für die vorliegende Methoden-Toolbox dar.

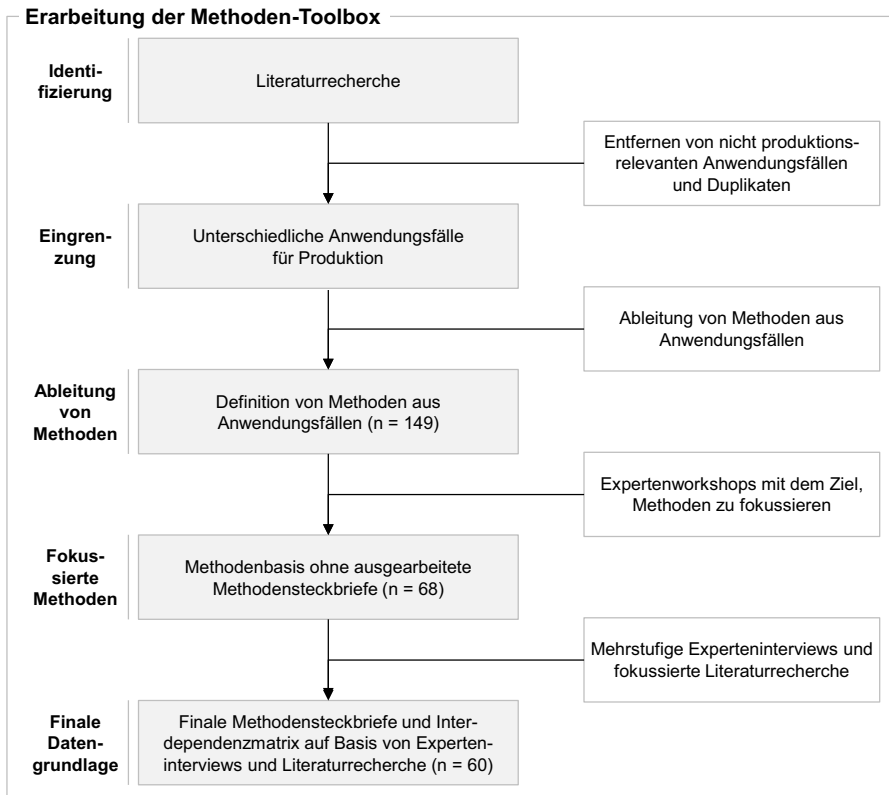


Abbildung 4-8: Vorgehen bei Erarbeitung der Datengrundlage der Methoden-Toolbox

Die Datengrundlage wurde maßgeblich durch die vom Autor angeleiteten studentischen Arbeiten A\_Adler (2019), A\_Krodel (2019), A\_Schaumann (2019), A\_Böhn (2018),

A\_Kandler (2018), A\_Kugel (2018), A\_Krogmann (2018), A\_Schweikert (2018) sowie A\_Steck (2018) erstellt und aufbereitet.

Basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche mit Fokus auf den Onlineplattformen „Landkarte Industrie 4.0“ (Plattform Industrie 4.0 2019) und „100 Orte für Industrie 4.0 in Baden-Württemberg“ (Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg 2019) sowie durch praktische Erfahrungen im Allgemeinen durch den Förderrahmen „Industrie 4.0 – Forschung auf den betrieblichen Hallenböden“ und im Speziellen im BMBF-Forschungsprojekt „Befähigungs- und Einführungsstrategien für Industrie 4.0 (Intro 4.0)“ (Lanza & Nyhuis 2018) wurden über 250 Industrie 4.0-Anwendungsfälle gesammelt. Auf dieser Grundlage wurden nach Entfernung der Duplikate rund 200 Anwendungsfälle identifiziert. Aus diesen Anwendungsfällen wurden 149 Industrie 4.0-Methoden abgeleitet.

Im Rahmen eines initialen Expertenworkshops mit Vertretern aus sechs Industrieunternehmen und drei Forschungseinrichtungen wurden 68 fokussierte Methoden identifiziert und für 23 Methoden die Beschreibung, Beziehungen zwischen den Methoden sowie die Auswirkungen auf die Zielgrößen „Kosten“, „Zeit“, „Qualität“, „Mitarbeiter“ und „Flexibilität“ abgeleitet. Basierend auf diesem initialen Workshop wurde die Datengrundlage auf 68 vorläufige Methodensteckbriefe ausgeweitet. Die Wirkzusammenhänge zwischen diesen 68 Industrie 4.0-Methoden und deren Zielgrößenauswirkungen wurden in iterativen Expertenworkshops mit Wissenschaftlern und Vertretern von vier Industrieunternehmen analysiert.

Aufbauend auf dieser Datengrundlage, weiteren Experteninterviews und den Ergebnissen einer umfassenden Literaturrecherche zu den technologischen und organisatorischen Voraussetzungen einzelner Methoden, wurden die final vorliegenden Wirkzusammenhänge zwischen 60 Methoden ermittelt, die Zielgrößenauswirkungen der Methoden identifiziert sowie der allgemeine Einführungsaufwand und technologische Reifegrad bestimmt. Die Reduzierung um 8 Methoden auf die 60 finalen allgemeinen Methodensteckbriefe resultiert aus dem Zusammenfassen ähnlicher Methoden, die durch unternehmensspezifische Anwendungsfälle in den vorgelagerten Schritten auftraten.

Die so ermittelten Wirkzusammenhänge wurden in einer Interdependenzmatrix erfasst. Exemplarisch ist eine Interdependenzmatrix für den Potentialmethodenstrang „Auftragsvisualisierung“ in Abbildung 4-9 dargestellt. Die Interdependenzmatrizen für die 60 Industrie 4.0-Methoden der allgemeinen Methoden-Toolbox sind in Anhang C: Methodenbeziehungen aufgeführt.

### Exemplarische Interdependenzmatrix

Methodenname	Abkürzung	AV	CSD	DS AS	DDK	DITS	EPD	ED AA	PF	VD PD	VED	ZVD	ZKN
Auftragsvisualisierung	AV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyberschutz von gespeich. Daten bzw. Org. und kom. IT-Sicherheit	CSD	-	-	-	-	-	-	V	-	-	-	-	-
Data Security von Anlagen/ Systemen bzw. Techn. IT-Sicherheit	DSAS	-	-	-	-	-	-	-	V	-	-	-	V
Datenaufnahme, Design und Klassifizierung	DDK	-	-	-	-	-	-	-	U	-	V	-	-
Durchgängigkeit von IT-Systemen	DITS	-	-	-	-	-	-	-	V	-	-	-	-
Erfassung von Prozessdaten (u. a.) durch Maschinen u. Werkzeuge	EPD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V	-	-
Erstellung digitaler Arbeitsanweisungen	EDAA	-	-	-	-	-	-	-	V	-	-	-	-
Papierlose Fertigung	PF	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verfügbarkeit digitaler Produktionsdaten	VDPD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V	-	-
Verfügbarkeit von Echtzeitdaten	VED	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zentrale Verfügbarkeit bzw. Verwaltung von Daten	ZVD	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zukunftsfähige Kommunikationsnetzwerke	ZKN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V	-	-

**Legende:**

Voraussetzende Beziehung – V | Unterstützende Beziehung – U

*Abbildung 4-9: Exemplarische Interdependenzmatrix für den Potentialmethodenstrang „Auftragsvisualisierung“*

Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird für jeden Potentialmethodenstrang eine separate Interdependenzmatrix erstellt, die alle relevanten Beziehungen und Effekte auf die Zielgrößen berücksichtigt und gegenüberstellt. Dabei werden alle Methoden mit voraussetzenden Beziehungen berücksichtigt. Um die definierten Beziehungen zwischen den Methoden zu visualisieren, können sie in einer Netzstruktur dargestellt werden. Abbildung 4-10 zeigt diese Darstellungsform exemplarisch für den Potentialmethodenstrang „Auftragsvisualisierung“.

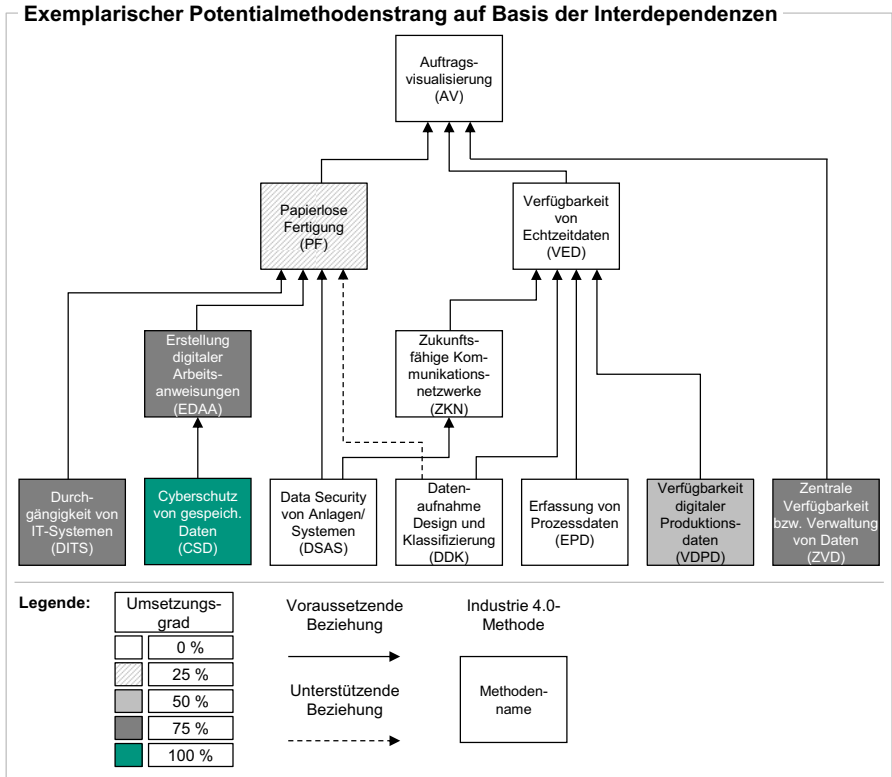


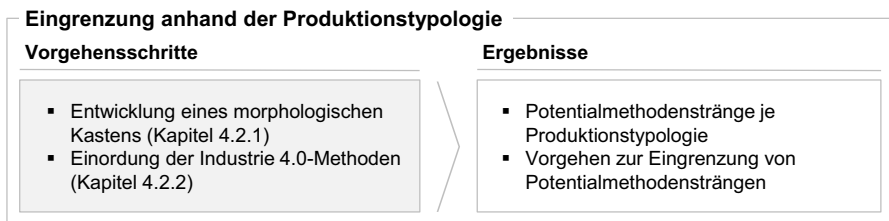
Abbildung 4-10: Visuelle Darstellung des Potentialmethodenstrangs „Auftragsvisualisierung“

Der Potentialmethodenstrang „Auftragsvisualisierung“ besteht aus insgesamt 12 Methoden, die entweder in einer voraussetzenden oder unterstützenden Beziehung zur Methode „Auftragsvisualisierung“ (AV) stehen. Zur vollständigen Implementierung des Potentialmethodenstrangs ist eine vorangehende Implementierung der vorgelagerten Methoden notwendig. Im vorliegenden Beispiel ist die Methode „Papierlose Fertigung“ (PF) bereits zu 25 % umgesetzt, obwohl nicht alle vorgelagerten Methoden zu 100 % umgesetzt sind. Dies ist möglich, da in diesem Fall voraussetzende Methoden wie z. B. „Durchgängigkeit von IT-Systemen“ (DITS) bereits zu einem hohen Grad eingeführt sind.

Kapitel 4.1 stellt somit eine strukturierte Datengrundlage in Form einer allgemeingültigen Industrie 4.0-Methoden-Toolbox mit 60 Methoden vor. Die Datengrundlage bildet die Ausgangsbasis für die in den folgenden Kapiteln vorgestellten drei Phasen der Methodik. Diese allgemeine Datengrundlage kann in Zukunft in nachfolgenden Forschungsarbeiten sowie in der konkreten Anwendung um weitere Industrie 4.0-Methoden ergänzt werden.

## 4.2 Phase 1: Eingrenzung relevanter Methoden anhand der Produktionstypologie

Ziel von Kapitel 4.2 ist es, basierend auf der in Kapitel 4.1 entwickelten allgemeinen Methoden-Toolbox ein Vorgehen zu entwickeln, das die für einen Anwender relevanten Industrie 4.0-Methoden bezüglich der Produktionstypologie auswählt. Dazu wird zunächst ein morphologischer Kasten für mögliche Produktionstypologien entwickelt, welcher entsprechend der vorliegenden betriebstypologischen Merkmale relevante Potentialmethodenstränge selektiert. Die Kernelemente dieser Phase sind in Abbildung 4-11 dargestellt.



*Abbildung 4-11: Vorgehen und Ergebnisse von Phase 1 der Methodik*

Dies erfolgt in Anlehnung an die vom Autor angeleiteten studentischen Arbeiten A\_Adler (2019), A\_Krodel (2019) und A\_Schaumann (2019).

### 4.2.1 Entwicklung eines morphologischen Kastens für Produktionstypologien

Um relevante Industrie 4.0-Methoden abhängig von den Ausprägungen der Produktion eines Unternehmens zu identifizieren, wird ein morphologischer Kasten entwickelt. Das in Kapitel 2.2 beschriebene Vorgehen wird für die Entwicklung des morphologischen Kastens für Produktionstypologien genutzt.



Insgesamt besteht der morphologische Kasten für Produktionstypologien aus den für den Industrie 4.0-Kontext relevanten Merkmalsausprägungen „Anteil manueller Arbeitsschritte“ und „Fertigungsart“. Die damit zu identifizierenden Bestimmungsgrößen und Bestimmungseigenschaften sowie die zugehörigen Merkmalsausprägungen sind in Abbildung 4-12 zusammengefasst.

**Morphologischer Kasten für Produktionstypologien**

Merkmal	Bestimmungsgröße/ -eigenschaft	Merkmalsausprägungen		
Anteil manueller Arbeitsschritte	Automatisierung	<b>Hoher Anteil manueller Tätigkeiten:</b> manueller und teilmechanisierter Produktionsprozess	<b>Mittlerer Anteil manueller Tätigkeiten:</b> teilautomatisierter Produktionsprozess	<b>Geringer Anteil manueller Tätigkeiten:</b> automatisierter Produktionsprozess
		<b>Fokus auf Stückzahl:</b> hohe Stückzahl pro Variante	<b>Ausgeglichenes Verhältnis:</b> aktueller Fokus weder auf Stückzahl noch auf Variantenzahl, Einordnung nach strategischem Fokus	<b>Fokus auf Variantenzahl:</b> geringe Stückzahl pro Variante
Fertigungsart	Produktionsfokus			

*Abbildung 4-12: Merkmale und Merkmalsausprägungen des morphologischen Kastens für Produktionstypologien (in Anlehnung an (A\_Schaumann 2019; Liebrecht & Krodell et al. 2019))*

Hierfür wird, analog zum Vorgehen im betriebstypologischen Modell (siehe Kapitel 2.2), auf Auswertungen aus der Praxis zurückgegriffen. Dafür werden Workshops durchgeführt und Methoden ausgewählt (A\_Krodell 2019; A\_Kandler 2018; A\_Kugel 2018; A\_Schweikert 2018). Durch die Ergebnisse der Workshops können geeignete Methoden für entsprechende Merkmalsausprägungen identifiziert werden. Die Darstellung des morphologischen Kastens zur Eignung von Industrie 4.0-Methoden orientiert sich an der von Peter (2009) gewählten Darstellung für die Eignung von Lean-Methoden für Ausprägungsstufen einer Kleinserienfertigung. Die Untersuchung der Auswirkungen der Methoden in den Merkmalsausprägungen wird angepasst und nach den Stufen geeignet, bedingt geeignet, ungeeignet und keine Aussage möglich bewertet. Durch die Übertragung eines spezifischen Produktionsprofils in den morphologischen Kasten kann das methodenspezifische Eignungsprofil einer Produktion abgeleitet werden, wel-

ches ungeeignete Methoden ausschließt und geeignete Methoden identifiziert. (A\_Krodel 2019) Es werden die Merkmale von Schomburg (1980) betrachtet, die eine Relevanz im Industrie 4.0-Kontext vorweisen (siehe Kapitel 2.2):

### **Anteil manueller Arbeitsschritte**

Die Merkmale Erzeugnisstruktur und Fertigungsstruktur beziehen sich auf die Produktkomplexität und die damit einhergehende Komplexität der Fertigung (Schomburg 1980). Abhängig von der Komplexität der Fertigung können Produktionsbereiche unterschiedlich automatisiert sein. Einerseits gibt es Industrie 4.0-Methoden, die den Ablauf manueller Arbeitsschritte effizienter gestalten. Andererseits gibt es Methoden, die eine automatisierte Produktion voraussetzen. Das erste Merkmal ist deshalb „Anteil manueller Arbeitsschritte“ mit den Ausprägungen „hoher Anteil“, „mittlerer Anteil“ und „geringer Anteil“ manueller Tätigkeiten (Beuche 1981). (Liebrecht & Krodel et al. 2019)

### **Fertigungsart**

Im Merkmal Fertigungsart wird „[...] die Häufigkeit der Leistungswiederholung im Produktionsprozess“ (Schomburg 1980) anhand der Auflagenhöhe und der Wiederholhäufigkeit gleicher oder ähnlicher Aufträge unterschieden. Die Typologie einer Produktion kann in die Merkmalsausprägungen „Einzelfertigung“, „Kleinserienfertigung“, „Serienfertigung“ und „Massenfertigung“ differenziert werden (Kellner & Lienland et al. 2018). Gegenläufig zur Auflagenhöhe und Wiederholhäufigkeit ist die Anzahl der produzierten Varianten. Bei steigender Variantenzahl sinkt bei konstanter Stückzahl die Stückzahl pro Variante (Pröhl & Werner et al. 2013). Dieser gegenläufige Zusammenhang bedeutet, dass für das Merkmal Fertigungsart zwischen dem Fokus auf eine hohe Stückzahl und dem Fokus auf eine hohe Variantenzahl unterschieden werden kann. Wenn Unternehmen bei hohen Variantenzahlen auch hohe Stückzahlen produzieren, hängt es von der Strategie des Unternehmens ab, welche der Ausprägungen höher gewichtet wird.

### **Nicht relevante Merkmale**

Nicht relevante Merkmale von Schomburg (1980) sind in diesem Sinne Erzeugnispektrum, Fertigungsablaufart, Auftragsauslösungsart, Dispositionsart und Beschaffungsart. Die drei letztgenannten liegen außerhalb des definierten Betrachtungsraums des morphologischen Kastens für Produktionstypologien und sind daher für dessen Entwicklung irrelevant.

Das Merkmal Erzeugnisspektrum wird in den Ausprägungen der Kundenspezifikation differenziert (Schomburg 1980). Diese Differenzierung ist für die Eignungsuntersuchung von Industrie 4.0-Methoden nicht sinnvoll, da das Ermöglichen einer kundenindividuellen Produktion ein zentrales Ziel von Industrie 4.0 ist. Somit sollte die Eignung einer Industrie 4.0-Methode nicht durch die Orientierung an Kundenspezifizierungen eingeschränkt werden. (A\_Krodel 2019; A\_Schaumann 2019)

Das Merkmal Fertigungsablaufart beschreibt die räumliche Anordnung der Produktion und die Flexibilität des Materialflusses. Je nach Ausprägung dieses Merkmals lassen sich unterschiedliche Potentiale durch den Einsatz von Industrie 4.0-Methoden realisieren (Liebrecht & Krodel et al. 2019). Da die Fertigungsablaufart bzw. Organisationsform aber abhängig von der Anzahl der manuellen Arbeitsschritte sowie der Fertigungsart ist und sich Methoden nach diesen Merkmalen besser einordnen lassen, soll die Fertigungsablaufart nicht als Merkmal des morphologischen Kastens genutzt werden. (A\_Schaumann 2019)

Zusätzlich zu den Merkmalen von Schomburg (1980) stellt die Betriebsgröße einen Faktor in der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Industrie 4.0-Methoden dar. Manche Methoden sind erst ab einer gewissen Mitarbeiterzahl und einer damit einhergehenden Komplexität innerbetrieblicher Prozesse wirtschaftlich. Da die Wirtschaftlichkeit in der Bewertungsphase des Vorgehensmodells evaluiert wird, soll dieses Merkmal hier nicht berücksichtigt werden. (A\_Schaumann 2019)

In den so entwickelten morphologischen Kästen (siehe Abbildung 4-12) können alle Potentialmethoden der in Kapitel 4.1 definierten Methoden-Toolbox eingestuft werden. Die Potentialmethoden weisen eine höhere strategische Relevanz für Unternehmen auf. Die Grundlagenmethoden dienen in erster Linie als Voraussetzung für die Potentialmethoden, weswegen sie nicht in den morphologischen Kästen eingeordnet werden. (A\_Krodel 2019)

#### **4.2.2 Einordnung der Industrie 4.0-Methoden**

Basierend auf dem morphologischen Kasten aus Kapitel 4.2.1 sollen nun geeignete Produktionstypologien für Industrie 4.0 abgeleitet werden. Dies wird durch die Kombination der zuvor beschriebenen Merkmalsausprägungen erreicht. Für die jeweils maximalen und minimalen Ausprägungen ergeben sich folgende vier Produktionstypologien (A\_Schaumann 2019):

- Fokus auf Variantenzahl bei manueller Produktion
- Fokus auf Variantenzahl bei automatisierter Produktion
- Fokus auf Stückzahl bei manueller Produktion
- Fokus auf Stückzahl bei automatisierter Produktion

Zusätzlich zu diesen vier Produktionstypologien gibt es den Bereich der universellen Anwendung. In diesen Bereich werden Methoden eingeordnet, die unabhängig von den Merkmalen des morphologischen Kastens für Unternehmen sinnvoll sind. Das heißt, es werden solche Methoden eingeordnet, welche entweder nicht durch die gewählten Merkmale eingeschränkt werden können oder die für Unternehmen mit allen Ausprägungen aller Merkmale relevant sind. Die Zuordnung der analysierten Methoden zu den Produktionstypologien kann Abbildung 4-13 entnommen werden.

### **Fokus- und Ausblicksmethoden**

Selbst für Unternehmen, die gleiche Ausprägungen in den Merkmalen des morphologischen Kastens haben, sind manche Industrie 4.0-Methoden relevanter als andere. Dies ist der Grund dafür, dass im morphologischen Kasten für jede Ausprägung der Merkmale zwischen Fokus- und Ausblicksmethoden unterschieden wird.

Fokusmethoden sind dabei solche Industrie 4.0-Methoden, die für ein Unternehmen mit diesen produktionstypologischen Eigenschaften den Kern der Industrie 4.0 darstellen. Dies bedeutet, dass Unternehmen, die diesen Produktionstypologien entsprechen und Industrie 4.0 in ihrer Produktion umsetzen möchten, klassischerweise diese Fokusmethoden aus der Methoden-Toolbox wählen, um sie im eigenen Unternehmen zu implementieren. Fokusmethoden sind dabei Potentialmethoden, die typischerweise weniger Voraussetzungen als Ausblicksmethoden besitzen und technologisch weniger fortgeschritten sind. Insgesamt werden als Fokusmethoden solche Methoden definiert, die bis auf wenige Ausnahmen für jedes Unternehmen der Produktionstypologie relevant sind. (A\_Schaumann 2019)

Ausblicksmethoden beschreiben Industrie 4.0-Methoden, die nur in bestimmten Situationen bzw. für bestimmte Unternehmen relevant sind und zusätzlich zu den Fokusmethoden eingeführt werden können. Sie sind oft technologisch weiter fortgeschritten und bauen auf den Fokusmethoden der Produktionstypologie auf. Ausblicksmethoden können aber auch unabhängig von Fokusmethoden sein. (A\_Schaumann 2019)

Methodeneignung nach Produktionstypologien		
	Fokus auf Variantenzahl	Fokus auf Stückzahl
Automatisierte Produktion	<p><b>4 Assistenzsysteme und Visualisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auftragsvisualisierung</li> <li>▪ Digitale Visualisierung von Maschinenzuständen</li> <li>▪ Integrierter Änderungsprozess</li> <li>▪ Intelligente Kommunikation zwischen Maschinen und Mitarbeitern</li> </ul> <p><b>5 Vernetzung und Transparenz</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intelligente Anlagenüberwachung und -diagnose</li> <li>▪ Predictive Maintenance</li> <li>▪ Simulation mit virtuellen Prototypen/ Prozessen</li> </ul> <p><b>6 Selbstorganisation und Dezentralisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Selbstkonfigurierung von Produktionsanlagen</li> <li>▪ Selbstkorrektur von Produktionsanlagen</li> <li>▪ Flexibilisierung von Produktionssystemen bzw. Plug &amp; Produce</li> <li>▪ Selbstorganisierte Produktion</li> </ul>	<p><b>4 Assistenzsysteme und Visualisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitale Visualisierung von Maschinenzuständen</li> <li>▪ Intelligente Kommunikation zwischen Maschinen und Mitarbeitern</li> <li>▪ Produktionsdaten per mobiler App</li> <li>▪ Visuelle In-Process-QS</li> </ul> <p><b>5 Vernetzung und Transparenz</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intelligente Anlagenüberwachung und -diagnose</li> <li>▪ Predictive Maintenance</li> <li>▪ Simulation mit virtuellen Prototypen/ Prozessen</li> </ul> <p><b>6 Selbstorganisation und Dezentralisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Selbstkorrektur von Produktionsanlagen</li> <li>▪ Flexibilisierung von Produktionssystemen bzw. Plug &amp; Produce</li> <li>▪ Selbstorganisierte Produktion</li> </ul>
Manuelle Produktion	<p><b>4 Assistenzsysteme und Visualisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auftragsvisualisierung</li> <li>▪ Echtzeitfeedback</li> <li>▪ Führen durch den Prozess</li> <li>▪ Integrierter Änderungsprozess</li> </ul> <p><b>5 Vernetzung und Transparenz</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intelligente Palette</li> <li>▪ Simulation mit virtuellen Prototypen/ Prozessen</li> </ul> <p><b>6 Selbstorganisation und Dezentralisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Selbstkonfigurierung von Produktionsanlagen</li> <li>▪ Selbstkorrektur von Produktionsanlagen</li> </ul>	<p><b>4 Assistenzsysteme und Visualisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitale Visualisierung von Maschinenzuständen</li> <li>▪ Echtzeitfeedback</li> <li>▪ Führen durch den Prozess</li> <li>▪ Integrierter Änderungsprozess</li> <li>▪ Produktionsdaten per mobiler App</li> <li>▪ Visuelle In-Process-QS</li> </ul> <p><b>5 Vernetzung und Transparenz</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intelligente Anlagenüberwachung und -diagnose</li> <li>▪ Intelligente Palette</li> <li>▪ Predictive Maintenance</li> </ul>
<b>Universelle Anwendung</b>		
	<p><b>4 Assistenzsysteme und Visualisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Papierlose Fertigung</li> <li>▪ Auftragsvisualisierung</li> <li>▪ Digitale Wartungsinformationen per AR</li> <li>▪ Integrierter Änderungsprozess</li> <li>▪ Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen/ Werkzeugen</li> <li>▪ Visuelle In-Process-QS</li> </ul> <p><b>6 Selbstorganisation und Dezentralisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Autonome Transportfahrzeuge</li> <li>▪ Intelligente Personaleinsatzplanung</li> <li>▪ Intelligente Werkstücke</li> <li>▪ Automatische Planung und Optimierung der Produktion</li> <li>▪ Selbstkorrektur von Produktionsanlagen</li> </ul>	<p><b>5 Vernetzung und Transparenz</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitale Kommunikation zwischen Mitarbeitern</li> <li>▪ Digitales Shopfloor Management</li> <li>▪ Intelligente Behälter</li> <li>▪ Lokalisierung und Tracking von Ressourcen</li> <li>▪ Bedarfsgerechte Versorgung von Produktionsanlagen</li> <li>▪ Digitale Ferndiagnose von Produktionsanlagen</li> <li>▪ Digitale Layoutplanung und Digitales Fabrikmodell</li> <li>▪ Intelligente Palette</li> <li>▪ Intelligente Produktionssteuerung und Lagerhaltung</li> <li>▪ Intelligente Routen durch Vernetzung</li> <li>▪ Intelligente standortübergreifende Transportprozesse</li> <li>▪ Live-Wertstromanalyse</li> <li>▪ Virtuelles Abbild der Produktion</li> </ul>
<p><b>Legende: Methode A – Fokusbildung   Methode B – Ausblickbildung   (X) Kategorie</b></p>		

Abbildung 4-13: Methodeneignung nach Produktionstypologien (in Anlehnung an (A\_Schaumann 2019))

Die Methoden werden dabei den einzelnen Merkmalen zugeordnet (siehe Abbildung 4-13). Die Unterscheidung zwischen Fokus- und Ausblicksmethoden muss beachtet werden. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

Ist eine Methode für beide involvierte Merkmalsausprägungen eine Fokusmethode, ist sie auch für die betrachtete Produktionstypologie eine Fokusmethode. Analog verhält es sich für Ausblicksmethoden. Eine Methode ist dann eine Ausblicksmethode für die Produktionstypologie, wenn sie für beide Ausprägungen eine Ausblicksmethode ist. Ist die Methode für eine Merkmalsausprägung eine Fokusmethode und für die andere Ausprägung eine Ausblicksmethode, ist sie für die Produktionstypologie eine Fokusmethode.

Auch die Industrie 4.0-Methoden des Bereichs der universellen Anwendung sind in Fokus- und Ausblicksmethoden aufgeteilt. Dabei sind universell anwendbare Fokusmethoden keine Fokusmethoden in einer der Merkmalsausprägungen und universell anwendbare Ausblicksmethoden keine Ausblicksmethoden in den Merkmalsausprägungen. Universell anwendbare Ausblicksmethoden können aber Fokusmethoden in einer der Merkmalsausprägungen sein.

Insgesamt sind jeder Produktionstypologie die Methoden der involvierten Merkmalsausprägungen zugeordnet. Zusätzlich sind die universell anwendbaren Methoden zu beachten. Diese können jeder Produktionstypologie zugeordnet werden. Sind universell anwendbare Ausblicksmethoden auch Fokusmethoden einer Typologie, werden sie für die Produktionstypologie auch unter Beachtung der universell anwendbaren Methoden als Fokusmethode klassifiziert.

### **Allgemeine Anwendung**

Abbildung 4-14 zeigt dabei beispielsweise das allgemeine Methodennetz für ein Unternehmen, welches der Typologie „Fokus auf Variantenzahl bei manueller Produktion“ zugeordnet wurde. Die Abkürzungen der Methodenbezeichnungen und entsprechenden Methodenbeschreibungen sind Abbildung 4-4 oder Anhang B: Methodensteckbriefe zu entnehmen. Anhang D: Methodennetze – Produktionstypologien stellt die weiteren drei Produktionstypologien dar.

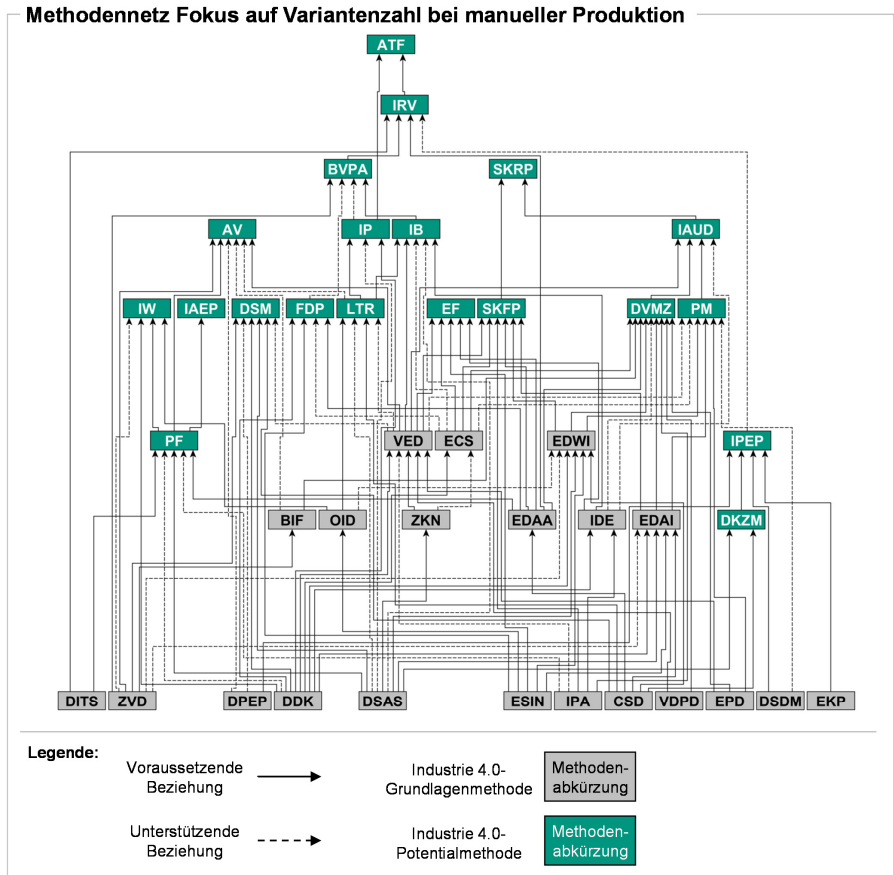


Abbildung 4-14: Exemplarisches Methodennetz der Produktionstypologie „Fokus auf Variantenzahl bei manueller Produktion“ (in Anlehnung an (A\_Schaumann 2019))

In diesem Methodennetz sind dabei alle Potentialmethoden enthalten, die Fokusmethoden der entsprechenden Typologie oder Fokusmethoden der universellen Anwendung sind. Außerdem werden alle Voraussetzungen dieser Potentialmethoden mit in das Methodennetz aufgenommen.

### 4.2.3 Vorgehensmodell Phase 1

Das Vorgehen kann sowohl allgemeingültig angewendet werden als auch spezifisch auf die besonderen Anforderungen eines Anwenders angepasst werden. Das Vorgehensmodell für Phase 1 ist in Abbildung 4-15 dargestellt.

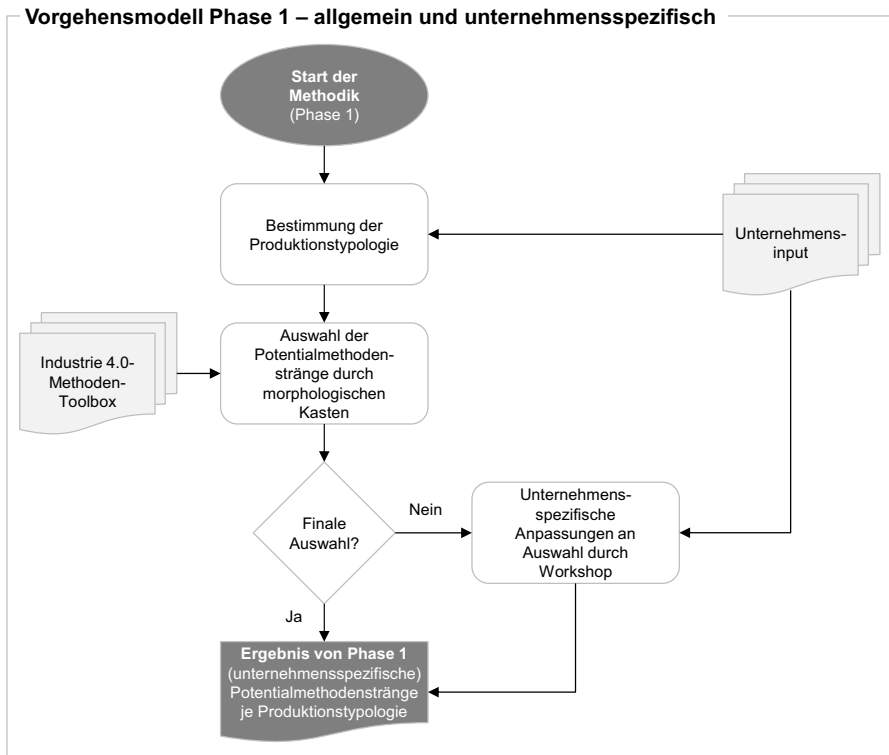


Abbildung 4-15: Vorgehensmodell Methodik Phase 1

Zum Start von Phase 1 wird das anwendende Unternehmen einer der identifizierten Produktionstypologien zugeordnet. Auf Basis dieser Typologie findet mittels des vorgestellten morphologischen Kastens eine Vorauswahl von Potentialmethodensträngen basierend auf der allgemeinen Methoden-Toolbox statt. Im allgemeingültigen Fall ist diese Auswahl final und das Ergebnis von Phase 1 in Form von Potentialmethodensträngen für die gewählte Produktionstypologie liegt vor und es kann mit der nächsten Phase des Vorgehensmodells begonnen werden.



Möchte ein Anwender spezifische Anpassungen z. B. durch Integration weiterer nicht gewählter oder neuer Methoden vornehmen, werden diese Methoden in die Auswahl integriert und es liegt ein unternehmensspezifisches Ergebnis aus Phase 1 vor. Das Vorgehen in den unternehmensspezifischen Workshops durchläuft fünf Schritte: 1) Prüfen der Ausblicksmethoden, 2) Prüfen der unterstützenden Methoden, 3) Streichen von Potentialmethoden, 4) Aufnahme von Methoden, die nicht der Produktionstypologie zugeordnet sind und 5) Sonstige Anpassungen.

Insgesamt soll das Methodennetz die unternehmensspezifische Industrie 4.0-Vision widerspiegeln. Nach der Finalisierung des Netzes kann mit der nächsten Phase des Vorgehensmodells begonnen werden.

### 4.3 Phase 2: Bewertung von Potentialmethodensträngen

Ziel von Kapitel 4.3 ist es, basierend auf den in Phase 1 (Kapitel 4.2) eingegrenzten Potentialmethodensträngen bewertete Einführungsszenarien abzuleiten. Diese Potentialmethodenstränge werden anhand von strategischen und monetären Zielgrößen und Kriterien evaluiert, um eine ganzheitliche Bewertung durchzuführen. Die Bewertung erfolgt auf Methodenebene.

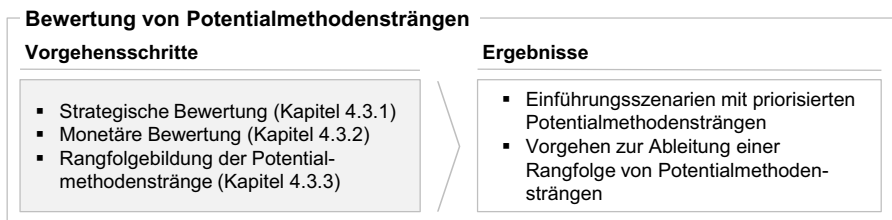


Abbildung 4-16: Vorgehen und Ergebnisse von Phase 2 der Methodik

Im vorliegenden Kapitel wird die Bewertung von Potentialmethodensträngen hinsichtlich strategischer und monetärer Kriterien in Anlehnung an die vom Autor angeleiteten studentischen Arbeiten A\_Lang (2019), A\_Meschenmoser (2019), A\_Strauss (2019), A\_Willhelm (2019), A\_Kugel (2018), A\_Tsiknas (2018), A\_Antoszkiewicz (2017), A\_Grahm (2017) und A\_Jacob (2016) vorgestellt.

### 4.3.1 Strategische Bewertung

Um die Nutzenpotentiale von einführbaren Industrie 4.0-Methoden zu bewerten, wird eine Kombination der Ansätze des Analytical Hierarchy Process (AHP) und der Nutzwertanalyse (NWA) verwendet. Dafür werden zuerst Bewertungskriterien ausgewählt, die die strategischen Unternehmensziele vollumfänglich abbilden. Mittels des AHP-Ansatzes werden im zweiten Schritt die Gewichtungen der zuvor ausgewählten Bewertungskriterien ermittelt. Der letzte Schritt besteht aus der Bestimmung der Kriterienausprägungen, die zusammen mit der Kriteriengewichtung in die NWA einfließen.

#### **Auswahl strategischer Bewertungskriterien**

Im ersten Schritt der strategischen Bewertung wird ein Zielsystem aufgestellt, welches den Bezugsrahmen der Investitionsbewertung der Industrie 4.0-Methoden bildet. Die Auswahl der strategischen Bewertungskriterien sollte im Einklang zur Unternehmensstrategie stehen und zur Erreichung der Unternehmensziele beitragen.

Auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche wurde für die Bewertungsmethodik ein Kriterienkatalog aufgestellt, der sich aus insgesamt 40 strategischen Bewertungskriterien zusammensetzt (siehe Abbildung 4-17). Diese Kriterien wurden anhand der Zielgrößen Kosten, Zeit, Qualität, Mitarbeiter und Flexibilität klassifiziert (siehe Kapitel 2.3). Eine detaillierte Beschreibung und Darstellung der jeweiligen Bewertungskriterien befindet sich in Anhang E: Kriterienkatalog.

Die Basis dazu stellen die Arbeiten von Fischer (2016), Gottmann (2016), Roth (2016), Schuh & Stich (2014), Wieland & Pfitzner (2014), Schulze & Brieke et al. (2012), Heger (2007), Westkämper (2006), Zangemeister (2000), Pelzer (1999) und Zäpfel (1989) dar.

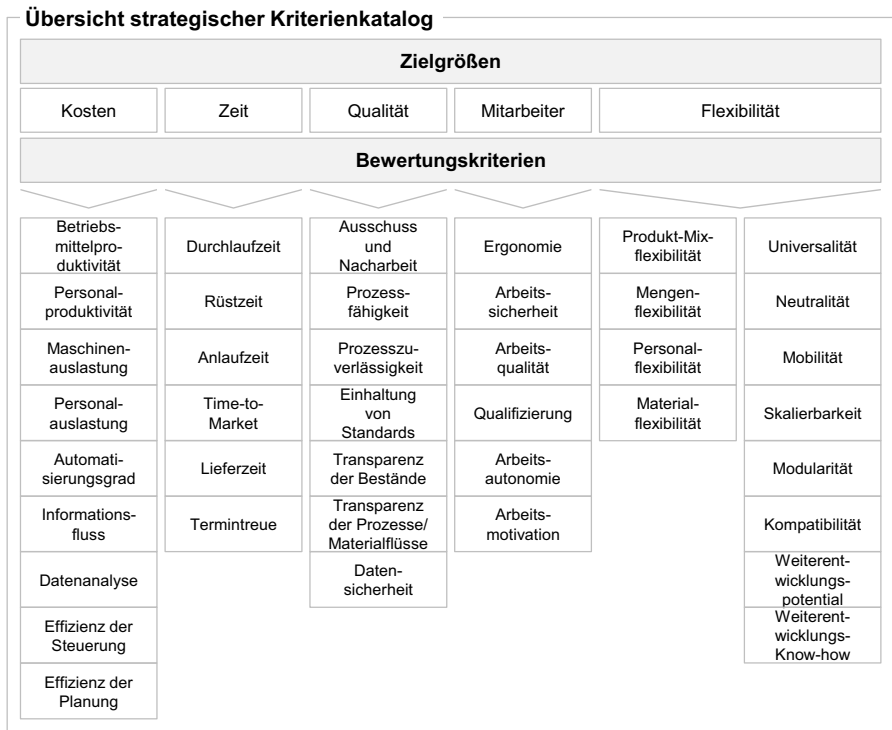


Abbildung 4-17: Übersicht strategischer Kriterienkatalog (in Anlehnung an (A\_Willhelm 2019; A\_Tsiknas 2018))

Der Kriterienkatalog kann an die unternehmensspezifischen Gegebenheiten beliebig angepasst und erweitert werden. Die Kriterienauswahl sollte durch Mitarbeiter aus unterschiedlichen Unternehmensbereichen erfolgen. Dies sichert eine bereichsübergreifende Beurteilung der Investitionsauswirkungen und ermöglicht die systemorientierte Sichtweise des Unternehmens in seiner Umwelt. Dabei ist es wichtig, dass die Kriterien ausreichend fragmentiert und ganzheitlich beschrieben werden. Trotzdem sollte die Anzahl ausgewählter Kriterien nicht zu groß sein, da ansonsten der Zeitaufwand für die anschließende Gewichtung der Kriterien hoch ist. Es wird eine Auswahl von 10 bis 15 strategischen Bewertungskriterien empfohlen. (A\_Meschenmoser 2019; A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018; Zangemeister 2000)

### Gewichtung strategischer Bewertungskriterien

Die ausgewählten Bewertungskriterien werden anschließend bezüglich der unternehmensspezifischen Prioritäten gewichtet. Dazu wird der AHP verwendet, der durch die Verwendung des paarweisen Vergleichs anstelle der subjektiven Schätzung jedes Kriteriums eine präzisere Abbildung der Präferenzen des Entscheidungsträgers und somit eine präzisere Kriteriengewichtung ermöglicht, als es beispielsweise das Zielbaumverfahren der NWA vermag (Götze 2014). Vorteilhaft ist außerdem die Möglichkeit, Gewichtungen über Hierarchieebenen hinweg zu strukturieren. (A\_Meschenmoser 2019; A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018) AHP und NWA werden in Kapitel 2.4 vorgestellt.

Um die Priorität der Kriterien hinsichtlich ihrer Relevanz für das jeweils übergeordnete Ziel zu bestimmen, erfolgt dabei die Unterteilung des Problems in eine zweistufige Hierarchie, wobei der ersten Ebene die allgemeinen Zielgrößen und der zweiten Ebene die ausgewählten Bewertungskriterien zugeordnet sind. Auf diesen beiden Hierarchieebenen werden paarweise Vergleiche durchgeführt. Der Paarvergleich wird durch die Neun-Punkte-Skala von Saaty (1990), die eine verbale Abfrage der Paarvergleiche ermöglicht, durchgeführt (siehe Kapitel 2.4.2). (A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018)

Die Paarvergleiche lassen sich für  $K$  Elemente in einer  $K \times K$ -Matrix darstellen, deren Hauptdiagonale den Wert 1 annimmt. Für jeden Wert oberhalb der Hauptdiagonalen ergibt sich bei einer Spiegelung entlang der Hauptdiagonalen für den korrespondierenden Wert unterhalb der Hauptdiagonalen der Reziprokwert des ursprünglichen Werts und umgekehrt (siehe Abbildung 4-18).

**Paarvergleichsmatrix (am Beispiel von fünf Kriterien)**

	Maschinen- auslastung	Personal- auslastung	Informa- tionsfluss	Daten- analyse	Effizienz der Steuerung	Lokale Gewich- tung
Maschinenauslastung	1	6	1/3	1	1/5	12,2 %
Personalauslastung	1/6	1	1/5	1/3	1/3	4,8 %
Informationsfluss	3	5	1	7	3	46,2 %
Datenanalyse	1	3	1/7	1	1/5	8,9 %
Effizienz der Steuerung	5	3	1/3	5	1	27,9 %

Abbildung 4-18: Exemplarische Paarvergleichsmatrix

Auf der obersten Hierarchieebene werden zunächst  $n$  Zielgrößen hinsichtlich ihrer Priorität bewertet. Es ergibt sich eine Paarvergleichsmatrix, in der festgelegt wird, wie stark die verschiedenen Zielgrößen im Rahmen der strategischen Bewertung ins Gewicht fallen. Auf der darunter liegenden Hierarchieebene ist für jede der  $n$  Zielgrößen eine separate Paarvergleichsmatrix zu bewerten. Durch die paarweisen Vergleiche innerhalb jeder Matrix wird die relative Wichtigkeit der einzelnen strategischen Bewertungskriterien hinsichtlich der jeweiligen übergeordneten Zielgrößen erfasst. (A\_Lang 2019; A\_Meschenmoser 2019; A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018)

Basierend auf den ausgefüllten Paarvergleichsmatrizen erfolgt die Berechnung der Kriteriengewichtungen auf Basis der Methode von Buckley (1985), in der ein vereinfachtes Berechnungsverfahren der Eigenvektormethode angewandt wird. Die positive Paarvergleichsmatrix  $A = (a_{ij})$  bildet den Ausgangspunkt für die Berechnung der Gewichtungen:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad 4-1$$

Im ersten Schritt werden die geometrischen Mittelwerte  $r_i$  jeder Zeile bestimmt:

$$r_i = \left[ \prod_{j=1}^n a_{ij} \right]^{1/n} \quad 4-2$$

Im zweiten Schritt werden die lokalen Gewichtungen der Kriterien  $k_i$  berechnet:

$$k_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad 4-3$$

Dieses Vorgehen wird für alle Paarvergleichsmatrizen angewendet. Für die Berechnung der Kriteriengewichtungen  $w_{nk}$  werden die ermittelten lokalen Gewichtungen der einzelnen Kriterien  $k_{nk}$  mit den Gewichtungen der jeweils übergeordneten Zielgröße  $n$  multipliziert. Die so berechneten Kriteriengewichtungen  $w_{nk}$  ergeben in Summe 100 % und fließen schließlich in die NWA ein. (A\_Lang 2019; A\_Meschenmoser 2019; A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018)

### **Ermittlung der Zielgrößen- und Kriterienausprägungen**

Um die strategische Bewertung abzuschließen, sind die Kriterienausprägungen  $T_{nk}$  der untersuchten Methoden  $m_M$  zu bestimmen. Dazu wird die NWA verwendet.

Die zuvor ausgewählten Kriterien  $k_{nk}$  müssen im ersten Schritt auf den Status Quo untersucht und eingeordnet werden. Für jedes strategische Bewertungskriterium werden drei Ausprägungsstufen definiert: „ungenügend bis mangelhaft“, „befriedigend bis gut“ und „sehr gut bis optimal“ (A\_Kugel 2018; A\_Tsiknas 2018; Zangemeister 2000). Der so ermittelte Status Quo ist der Ausgangspunkt der weiteren Bewertung von Phase 2 und der Simulation in Phase 3.

Im zweiten Schritt werden die Methoden hinsichtlich des Einflusspotentials auf die strategischen Bewertungskriterien bewertet. Mit Hilfe einer Bewertungsskala von  $-3 \leq T_{nk} \leq +3$  können sowohl positive als auch negative Effekte der Kriterienausprägungen abgebildet werden. Alle ermittelten Kriterienausprägungen  $T_{nk}$  für jede Methode  $m_M$  werden mit den zuvor erhobenen Kriteriengewichtungen  $w_{nk}$  multipliziert und ergeben die Teilnutzenwerte  $V_{nk;m_M}$ .

**Aufbau der Nutzwertanalyse**

			Methoden des Strangs Auftragsvisualisierung				
			$m_1$	...	$m_{12}$		
Zielgröße $n_{1...5}$	Kriterium $k_{11...5k}$	Gewichtung $w_{nk}$ in [%]	Ausprägung $T_{nk;1}$	Nutzwert $V_{nk;1} = w_{nk} * T_{nk;1}$	...	Ausprägung $T_{nk;12}$	Nutzwert $V_{nk;12} = w_{nk} * T_{nk;12}$
$n_1$	$k_{11}$	$w_{11}$	$T_{11;1}$	$V_{11;1}$	...	$T_{11;12}$	$V_{11;12}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$k_{1k}$	$w_{1k}$	$T_{1k;1}$	$V_{1k;1}$	...	$T_{1k;12}$	$V_{1k;12}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$n_5$	$k_{51}$	$w_{51}$	$T_{51;1}$	$V_{51;1}$	...	$T_{51;12}$	$V_{51;12}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$k_{5k}$	$w_{5k}$	$T_{5k;1}$	$V_{5k;1}$	...	$T_{5k;12}$	$V_{5k;12}$
<b>Summe</b>		<b>100 %</b>		$\sum_{n=1}^5 \sum_{k=1}^K v_{nk;1}$	...		$\sum_{n=1}^5 \sum_{k=1}^K v_{nk;12}$

Abbildung 4-19: Aufbau der Nutzwertanalyse (in Anlehnung an (A\_Lang 2019; A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018; A\_Tsiknas 2018))

Diese Teilnutzenwerte werden zum Gesamtnutzenpotential aufsummiert (siehe Abbildung 4-19). Der Gesamtnutzen bzw. das Strategiepotential spiegelt die relative Vorteilhaftigkeit der jeweiligen Methoden wider und fließt in die abschließende Entscheidungsvorlage ein.

Nach der strategischen Bewertung ergeben sich die aus der durchgeführten Nutzwertanalyse abgeleiteten Strategiepotentiale der bewerteten Methode. Falls keine monetären Informationen der Methodenstränge vorliegen, können auf Basis der in den Methodensteckbriefen hinterlegten allgemeinen Aufwandskategorien (siehe Kapitel 4.4.1) die Methoden in eine Rangfolge überführt werden (siehe Kapitel 4.3.3). Falls monetäre Werte vorliegen, wird im nächsten Schritt die monetäre Bewertung durchgeführt.

### **4.3.2 Monetäre Bewertung**

Neben der in Kapitel 4.3.1 durchgeführten strategischen Bewertung ist bei allen wichtigen Unternehmensentscheidungen eine ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung essentiell. Dafür werden bei der monetären Bewertung zunächst auf Basis spezifisch detaillierter Methodensteckbriefe alle anfallenden Zahlungsströme identifiziert und aggregiert. Mit Unsicherheit behaftete Zahlungsströme werden über PERT-Beta-Verteilungen modelliert und durch eine abschließende Monte-Carlo-Simulation des Kapitalwerts berücksichtigt. Dadurch können alle Industrie 4.0-Methoden auch monetär bewertet werden. (A\_Meschenmoser 2019; A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018; Liebrecht & Jacob et al. 2017; A\_Jacob 2016)

#### **Erhebung monetärer Kriterien**

Bei der monetären Bewertung werden alle Ein- und Auszahlungen berücksichtigt, die mit den gewählten Industrie 4.0-Methoden in Zusammenhang stehen.

Für die Kategorisierung der in dieser Arbeit als monetäre Kriterien bezeichneten Zahlungsarten werden die Ansätze von Ernst & Schmidt et al. (2016), Seiter & Bayrle et al. (2016), Pfeffer (2014), Schulze & Brieke et al. (2012), Brieke (2009), Teich & Kolben-schlag et al. (2008) und Zangemeister (2000) herangezogen. Die monetären Kriterien werden in einmalige Ein- und Auszahlungen sowie nach periodisch anfallenden Ausgaben und Einsparungen unterteilt (siehe Abbildung 4-20). Im Anhang E: Kriterienkatalog befindet sich für jedes monetäre Kriterium eine detaillierte Beschreibung.

### Übersicht monetärer Kriterienkatalog

Einmalige Ausgaben		Periodische Ausgaben
<b>Planung und Realisierung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Externes Planungspersonal</li> <li>▪ Internes Planungspersonal</li> <li>▪ Reisekosten</li> <li>▪ Sachmittel</li> <li>▪ Personalaufwand</li> <li>▪ Anlaufaufwand</li> <li>▪ Anpassung von Softwaresystemen</li> <li>▪ Installation/ Anbindung</li> <li>▪ Umzug/ Umstellung</li> <li>▪ Genehmigungen</li> <li>▪ Abnahmen</li> <li>▪ Entgangener Deckungsbeitrag</li> </ul>	<b>Anlagevermögen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grundstücke/ Gebäude</li> <li>▪ Maschinen/ Anlagen</li> <li>▪ Werkzeuge</li> <li>▪ Prüf-/ Lager-/ Transporteinrichtungen</li> <li>▪ Arbeitsplatzausstattung</li> <li>▪ Hardware/ Software</li> <li>▪ Adaption der Arbeitsumgebung</li> <li>▪ Eigener Herstellungsaufwand</li> <li>▪ Anpassung technischer Einrichtungen</li> <li>▪ Anpassung sozialer Einrichtungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Personalkostenerhöhung</li> <li>▪ Miete</li> <li>▪ Entsorgung von Abfällen und Abgaben für Emissionen</li> <li>▪ Kosten für Wartung, Pflege, etc.</li> <li>▪ Dienstleistungen Dritter und interner Stellen</li> <li>▪ Lizenzgebühren</li> <li>▪ Materialkostenerhöhung</li> </ul>
Einmalige Einnahmen		Periodische Ersparnisse bzw. Erlösverbesserungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Veräußerungserlöse</li> <li>▪ Bestandsminderungen</li> <li>▪ Öffentliche Fördermittel</li> <li>▪ Sonstige einmalige Einnahmen</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Materialkostenreduktion</li> <li>▪ Personalkostenreduzierung</li> <li>▪ Reduzierung der Logistikkosten</li> </ul>

Abbildung 4-20: Übersicht monetärer Kriterienkatalog  
(in Anlehnung an (A\_Willhelm 2019; A\_Jacob 2016))

### Ermittlung der Zahlungshöhe

Alle anfallenden Zahlungsarten sind für die zu bewertenden Industrie 4.0-Methoden zu erheben. Dafür kann der hier vorgestellte monetäre Kriterienkatalog bei Bedarf unternehmensspezifisch angepasst werden.

Einmalige Ein- und Auszahlungen beziehen sich auf den Zeitpunkt  $t = 0$  der Investition in eine Industrie 4.0-Methode. Die Entwicklung der periodisch anfallenden Effekte ist über mehrere Perioden zu erfassen, um zeitlich versetzt eintretende Kosteneinsparungen und Erlösverbesserungen zu berücksichtigen. Die Anzahl der zu erfassenden Perioden ergibt sich dabei aus dem Betrachtungszeitraum der Kapitalwertberechnung, der sich an der vom Unternehmen angestrebten Amortisationszeit orientiert. Als Richtwert für die monetäre Bewertung werden fünf Jahre angenommen. (A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018)

Eine exakte zeitliche Prognose periodischer Effekte von Industrie 4.0-Methoden ist wegen mangelnder Erfahrungswerte nicht möglich. Deshalb wird im Rahmen der entwi-



ckelten Methodik eine vereinfachte Abschätzung der Gesamteffekte über den Betrachtungsraum verwendet. Dabei muss die Zahlung, die am Ende der ersten Periode der Investitionsanschaffung ( $t = 1$ ) anfällt, erhoben werden. Weiterhin muss eine Prognose der Zahlungshöhe für die letzte betrachtete Periode ( $t = T$ ) nach der Investitionsrealisierung erhoben werden. Für den dazwischen liegenden Zeitraum wird ein linearer Zahlungsverlauf zwischen der ersten und letzten Periode angenommen. Dadurch kann die Entwicklung zukünftiger Zahlungen mithilfe der Betrachtung des Gesamteffekts aufwandsarm dargestellt werden. (A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018)

Es gibt unterschiedliche Vorgehensweisen zur Ermittlung und Bewertung aller relevanten Zahlungsarten eines Unternehmens. Vor allem mit Hilfe der internen Kostenrechnung können relevante Kostensätze, wie z. B. Maschinenstundensätze oder Personalstundensätze, ermittelt werden. In Abbildung 4-21 ist eine beispielhafte Berechnungsvorschrift für laufend anfallende Wartungskosten aufgeführt. Die periodischen Kosten können basierend auf der Anzahl der Betriebsstunden einer Industrie 4.0-Methode, den Wartungsstunden und den Personalkosten berechnet werden. (A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018)

<b>Beispielhafte Berechnungsvorschrift</b>		
<b>Komponente</b>	<b>Einheit</b>	<b>Betrag</b>
Betriebsstunden mit notwendiger Verfügbarkeit von Echtzeitdaten	h/Jahr	4.000
x Wartungsstunden pro Betriebsstunde	h/h	0,02
x Personalkosten pro Wartungsstunde	€/h	52
<b>Kosten</b>	<b>€/Jahr</b>	<b>4.160</b>

*Abbildung 4-21: Berechnungsvorschrift für periodische Ausgaben der Methode „Verfügbarkeit von Echtzeitdaten“ (in Anlehnung an (A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018))*

Zahlungshöhen können zum Bewertungszeitpunkt bereits bekannt sein. Bei manchen monetären Kriterien kann aufgrund mangelnder Informationen und Erfahrungswerte lediglich eine mit Unsicherheit behaftete, subjektive Schätzung der Zahlungshöhe vorgenommen werden. (A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018)

Die monetäre Bewertung des Potentialmethodenstrangs ergibt sich aus der Summe der monetären Bewertungen aller beteiligten Industrie 4.0-Methoden. Nach Abschluss der

monetären Bewertung existiert eine Übersicht über alle Ein- und Auszahlungen sämtlicher für das Unternehmen relevanter Industrie 4.0-Methoden. (A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018)

### **Aggregation monetärer Einzelbewertungen**

Nach der Bewertung aller einzelnen monetären Kriterien für die zu bewertenden Potentialmethodenstränge folgt nun die Aggregation der Zahlungshöhen zu einem Gesamtwert. Aufgrund der einfachen und transparenten Anwendung erfolgt diese Aggregation mit Hilfe der Kapitalwertmethode (siehe Kapitel 2.4.1).

Dazu sind zunächst die Zahlungshöhen jeder Periode, der Betrachtungszeitraum sowie der Kalkulationszinssatz festzulegen. Die Höhe des Kalkulationszinssatzes richtet sich nach den unternehmensspezifischen Investitions- und Finanzierungsbedingungen und hängt von der Entscheidung hinsichtlich einer Eigen-, einer Fremd- oder einer Mischfinanzierung der Investition sowie der Risikoprämie ab. Letztlich ergibt sich der Kapitalwert aus der Summe der periodenweise aggregierten Zahlungshöhen, die mit einem Kalkulationszinssatz diskontiert werden. (A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018)

Im Falle unsicherer zukünftiger Zahlungsströme müssen vor der Kapitalwertberechnung noch die auf den drei Schätzern basierenden PERT-Beta-Verteilungen für jedes monetäre Kriterium aggregiert werden. Mathematisch entspricht die Aggregation einer Addition der entsprechenden Zufallsvariablen. Im Falle unabhängig verteilter Zufallsvariablen entspricht diese Addition der Faltung der individuellen Verteilungsfunktionen. Die Berechnung der gemeinsamen Dichtefunktion ist schon bei zwei Zufallsvariablen sehr aufwendig, wird daher für mehrere PERT-Beta-Funktionen, deren Faltungspotenz deutlich komplexer ist, mathematisch zu aufwendig (Cottin & Döhler 2013). Deshalb wird für die Aggregation der unsicheren Einzelbewertungen auf die Methode der Monte-Carlo Simulation zurückgegriffen. Die Simulation basiert dabei auf dem Gesetz der großen Zahlen, wonach sich die relative Häufigkeit eines Zufallsergebnisses um die Wahrscheinlichkeit des Zufallsergebnisses stabilisiert, solange das dazugehörige Zufallsexperiment unter den gleichen Bedingungen wiederholt wird (Cottin & Döhler 2013). (A\_Jacob 2016)

Für die Modellierung der Unsicherheit der monetären Kriterien wird die PERT-Beta-Verteilung verwendet. Neben einer realitätsnahen und nachvollziehbaren Abbildung von Expertenwissen bei wenigen Erfahrungswerten zeichnet sich die PERT-Beta-Verteilung zusätzlich durch eine einfache Anwendbarkeit durch die Schätzung von nur drei

Parametern aus (A\_Jacob 2016). Für jede mit Unsicherheit behaftete Zahlungshöhe der einmaligen und periodisch anfallenden Effekte wird dieses Vorgehen angewendet. Darauf aufbauend werden betaverteilte Zufallsvariablen generiert, indem den inversen PERT-Beta-Funktionen eine Wahrscheinlichkeit in Form einer Zufallszahl übergeben wird. Eine neue Zufallszahl wird in jedem Simulationsdurchlauf aus jeder modellierten PERT-Beta-Verteilung generiert und zusammen mit den sicheren Zahlungshöhen zu einem Kapitalwert aggregiert. Die Rechengenauigkeit der Simulationen wächst mit der Wurzel der Anzahl an durchgeführten Simulationen. Es werden in der Regel ca. 10.000 Wiederholungen empfohlen (Kamarianakis 2013; Cottin & Döhler 2013). Auf Basis der relativen Häufigkeitsverteilungen kann ein Histogramm des erweiterten Kapitalwerts erstellt werden (siehe Abbildung 4-22). (A\_Meschenmoser 2019; A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018; A\_Tsiknas 2018; A\_Antoszkiewicz 2017; A\_Grahm 2017; A\_Jacob 2016)

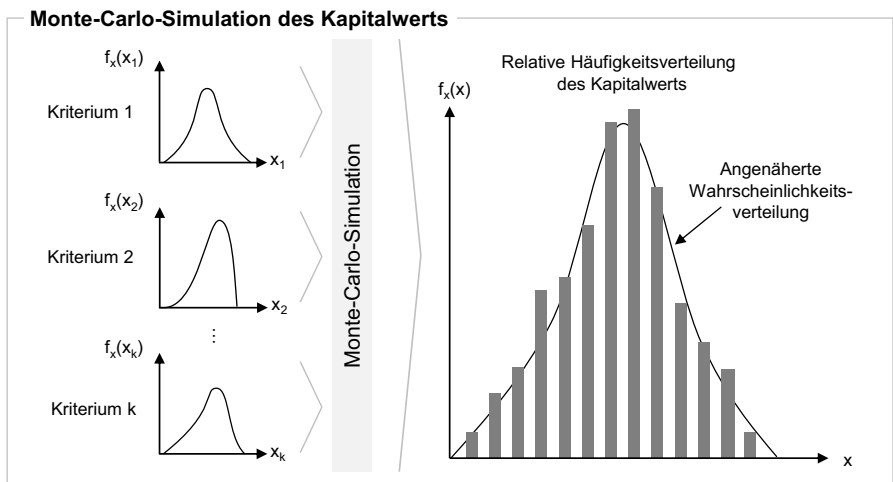


Abbildung 4-22: Exemplarische Monte-Carlo-Simulation des Kapitalwerts  
(in Anlehnung an (Krebs 2012))

Durch das arithmetische Mittel, den Median oder den Modalwert der Häufigkeitsverteilung kann der erwartete monetäre Gegenwert des Potentialmethodenstrangs modelliert werden. Bei einer rein monetären Betrachtungsweise ist derjenige Methodenstrang am vorteilhaftesten, der den höchsten zu erwartenden Kapitalwert aufweist. Für eine kriti-

sche Diskussion über die Planungssicherheit und das finanzielle Risiko können zusätzliche Werte wie z. B. die Standardabweichung oder die Quantile als Risikokennzahlen abgebildet werden.

### 4.3.3 Rangfolgebildung der Potentialmethodenstränge

Alle in den Potentialmethodensträngen enthaltenen Methoden werden in der Bewertung betrachtet, wobei sich sowohl der strategische Nutzen als auch die monetären Werte der einzelnen Methoden am Ende der Bewertung wieder auf Strangebene aggregieren lassen. Dieses Vorgehen ermöglicht dem Anwender, seine abschließende Entscheidung auf einem höheren Abstraktionsniveau zu treffen, ohne die jeweiligen Voraussetzungen zu kennen, da Methodenstränge grundsätzlich voraussetzungsfrei sind. Zudem sind Grundlagenmethoden oftmals aufwendig in der Umsetzung, besitzen nur ein geringes strategisches Potential. Deshalb kann die isolierte Betrachtung der bewerteten Grundlagenmethoden den Eindruck erwecken, dass diese nicht zur Zielerreichung beitragen. Da sie jedoch Voraussetzung zur Umsetzung der Potentialmethoden sind, ist ihre Implementierung zwingend nötig.

Die ganzheitliche Bewertung anhand der Ergebnisse der strategischen und monetären Bewertung dient als Grundlage für die Priorisierung der Potentialmethodenstränge. Zur Ableitung eindeutiger Rangfolgen wird das TOPSIS-Verfahren (siehe Kapitel 2.4.2) angewendet.

Die bewerteten Methodenstränge stellen den Input für das TOPSIS-Verfahren dar und werden im ersten Schritt normiert, wodurch die Ausprägungen der zwei Dimensionen Strategiepotential und Kapitalwert vergleichbar gemacht werden. Die normierten Ergebnisse der strategischen und monetären Bewertung werden in einer Entscheidungsmatrix zusammengeführt. Im zweiten Schritt muss das Gewichtungsverhältnis zwischen dem strategischen Nutzenpotential und dem Kapitalwert gewählt werden. Das Verhältnis ist in Abhängigkeit von den individuellen Unternehmenspräferenzen und -ressourcen anzupassen. Im allgemeinen und spezifischen Fall können frei wählbare Szenarien dargestellt werden. Das Ergebnis der Multiplikation der Gewichtungsfaktoren mit den Einträgen der Matrix ist eine gewichtete und normierte Entscheidungsmatrix (siehe Abbildung 4-23). (A\_Meschenmoser 2019; A\_Strauss 2019; A\_Kugel 2018)

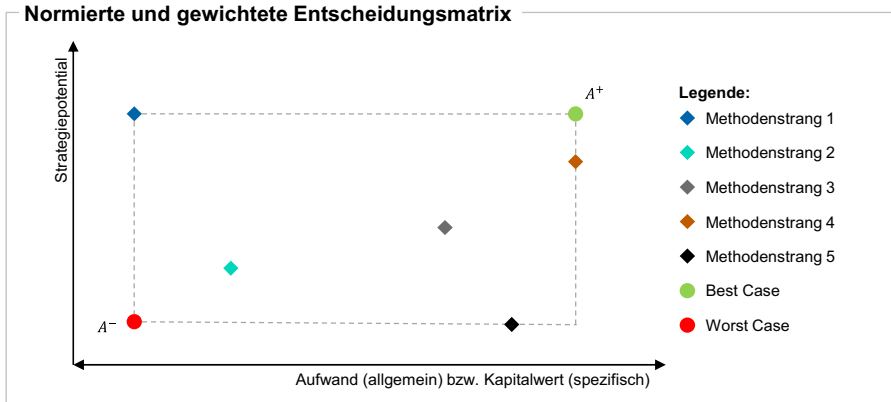


Abbildung 4-23: Normierte und gewichtete Entscheidungsmatrix

Der Output des TOPSIS-Verfahrens sind die Abstände der einzelnen Alternativen zur jeweils theoretisch besten bzw. schlechtesten Lösung ( $A^+$  bzw.  $A^-$ ). Aus diesen wird der Index der relativen Nähe  $C_{i+}$  ermittelt, der den euklidischen Abstand der bewerteten Investitionsalternativen zu den beiden Extrema widerspiegelt. Ein höherer Index zeichnet dabei eine vorteilhaftere Methode aus, da dies einen im Verhältnis größeren Abstand zur Worst-Case-Lösung bedeutet. Die Priorisierung der Potentialmethodenstränge ergibt sich schließlich aus der absteigenden Sortierung der Indizes  $C_{i+}$  (siehe Abbildung 4-24).

**Priorisierung (am Beispiel von fünf Methodensträngen)**

Methodenstrang	Index relativer Nähe
Methodenstrang 4	0,94
Methodenstrang 3	0,74
Methodenstrang 5	0,71
Methodenstrang 1	0,49
Methodenstrang 2	0,23

Abbildung 4-24: Beispielhafte Priorisierung von Methodensträngen

Das TOPSIS-Verfahren ermittelt zunächst eine Priorisierung der Methodenstränge, indem es jeden Potentialmethodenstrang unabhängig voneinander bewertet. Die Unabhängigkeit der Methodenstränge ist jedoch nicht mehr gegeben, sobald eine Industrie 4.0-Methode in mehr als einem Strang enthalten ist. Erfolgt die Implementierung eines Methodenstrangs, der eine mehrfach auftretende Methode enthält, so ändert sich die

Bewertung aller Stränge, die diese Methode ebenfalls enthalten. Um dieses Problem zu lösen, wird die strategische und monetäre Bewertung nach jeder Implementierung einer Methode eines Methodenstrangs an die neuen Gegebenheiten angepasst und iterativ durchgeführt. (A\_Strauss 2019)

Für die Neubewertung wird angenommen, dass sowohl die periodischen als auch die einmaligen Ein- und Auszahlungen der schon implementierten Methoden bei einer erneuten Bewertung nicht mehr berücksichtigt werden. Für die strategischen Potentiale bereits implementierter Methoden gilt dasselbe. Die Durchführung der iterativen Bewertung endet, sobald alle Potentialmethodenstränge evaluiert wurden. Die Iteration wird von einem Algorithmus innerhalb des Bewertungstools durchgeführt. Dazu werden, ausgehend von der obersten Hierarchiestufe des Methodennetzes, alle direkt voraussetzenden Methodenstränge mit Hilfe des TOPSIS-Verfahrens priorisiert. (A\_Meschmoser 2019)

Die Priorisierung der Potentialmethodenstränge stellt die Grundlage für die Entscheidung hinsichtlich einzuführender Industrie 4.0-Methoden dar. Darauf aufbauend müssen die Kapazitäten des Unternehmens und das vorhandene Budget in die Betrachtung mit einbezogen werden.

Durch die Variation der Inputparameter des TOPSIS-Verfahrens lassen sich heuristisch unterschiedliche Einführungsszenarien generieren. Die Priorisierung der Potentialmethodenstränge lässt sich einerseits durch die Gewichtung der beiden Bewertungsdimensionen in Form von Implementierungsstrategien variieren. Dabei wird eine Abstufung in fünf Schritten vorgenommen, d. h. die Gewichtung des Strategiepentials zum Aufwand (allgemein) bzw. Kapitalwert (spezifisch) variiert von 0 % bis 100 % in Schritten von 25 %-Punkten. Andererseits wird die Priorisierung durch die Betrachtung unterschiedlicher Fokuszielgrößen beeinflusst. Durch Variation auf Fokuszielgrößen (Kosten, Zeit, Qualität, Mitarbeiter und Flexibilität) lassen sich jeweils fünf verschiedene Fälle ableiten. Zusätzlich wird der holistische Fall betrachtet, der aus der gleichgewichteten Einbeziehung der Zielgrößen in das Strategiepential hervorgeht. Daraus ergeben sich fünf weitere Fälle, sodass insgesamt 30 verschiedene Einführungsszenarien abgeleitet werden können.

Diese Einführungsszenarien werden in der nächsten Phase (siehe Kapitel 4.4) simuliert, um deren Vorteilhaftigkeit zu beurteilen. Dieses Vorgehen ist notwendig, da die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer Implementierungsreihenfolge wesentlich durch

die komplexen Wirkzusammenhänge des Methodennetzes und die Implementierungsdauer determiniert sind. Durch die Priorisierung durch unterschiedliche Implementierungsstrategien wird an dieser Stelle heuristisch aus allen denkbaren Reihenfolgen eine bereits vorteilhaft anzunehmende Teilmenge generiert, deren Vorteilhaftigkeit in der nächsten Phase durch eine simulationsgestützte Analyse bewertet werden kann.

**Allgemeine Anwendung**

Abbildung 4-25 veranschaulicht exemplarisch die verschiedenen Einführungsszenarien, die durch die Variation des Gewichtungsverhältnisses des TOPSIS-Verfahrens für den allgemeinen Fall generiert wurden.

**Unterschiedliche Einführungsszenarien allgemeiner Fall**

Umsetzungsgrad (UG) der Methoden: 0 %		Implementierungsstrategie				
		Strategiepotential: 100 % Aufwand: 0 %	Strategiepotential: 75 % Aufwand: 25 %	Strategiepotential: 50 % Aufwand: 50 %	Strategiepotential: 25 % Aufwand: 75 %	Strategiepotential: 0 % Aufwand: 100 %
Fokuszielgröße	Kosten	Szenario 100K	Szenario 75K	Szenario 50K	Szenario 25K	Szenario 0K
	Zeit	Szenario 100Z	Szenario 75Z	Szenario 50Z	Szenario 25Z	Szenario 0Z
	Qualität	Szenario 100Q	Szenario 75Q	Szenario 50Q	Szenario 25Q	Szenario 0Q
	Mitarbeiter	Szenario 100M	Szenario 75M	Szenario 50M	Szenario 25M	Szenario 0M
	Flexibilität	Szenario 100F	Szenario 75F	Szenario 50F	Szenario 25F	Szenario 0F
	Holistisch	Szenario 100H	Szenario 75H	Szenario 50H	Szenario 25H	Szenario 0H

*Abbildung 4-25: Exemplarische Einführungsszenarien (in Anlehnung an (A\_Lang 2019; A\_Meschenmoser 2019))*

Die möglichen Einführungsszenarien werden wie beschrieben mit einem Algorithmus für jede Implementierungsstrategie- und Fokuszielgrößenkombination generiert und an die Simulation übergeben. Für den Fall 0/100 ergibt sich die Priorisierung ausschließlich nach dem Aufwand, wobei für alle Strategiepotentiale die gleiche Implementierungsreihenfolge entsteht. Die abgebildeten Aufwandswerte entsprechen den iterativ bestimmten Strangwerten, d. h. die Aufwände bereits umgesetzter Methoden werden im nächsten Iterationsschritt aus der Berechnung des Gesamtaufwandes je Strang abgezogen. Im umgekehrten Fall, mit einer Gewichtung von 100/0, also der isolierten Betrachtung des Strategiepotentials ergibt sich die Priorisierung ebenfalls aus den kumulierten Strangwerten. Die qualitativen Werte in beiden Fällen sind aufgrund der Funktionsweise der Methodenpriorisierung und den voraussetzenden Beziehungen des Methodennetzes nicht in auf- bzw. absteigender Reihenfolge angeordnet. Bei der Betrachtung des Strategiepotentials wird beispielsweise ausgehend von dem Strang mit dem

höchsten kumulierten Wert jede Hierarchiestufe durchlaufen, solange bis auf der nächsten Stufe keine Potentialmethoden mehr vorzufinden sind. Auf dieser Stufe wird dann die Methode mit dem höchsten Strategiepotehtial gewählt. Umgekehrtes gilt für den Aufwand, sprich die Methode mit dem geringsten Aufwand wird priorisiert. Die weiteren drei Fälle 25/75, 50/50 und 75/25 werden nach dem gleichen Prinzip gebildet. Die Auswahl der zu priorisierenden Methode erfolgt nach dem allgemeinen TOPSIS-Verfahren. Dazu werden sowohl der Aufwand als auch das Strategiepotehtial zunächst normiert und gewichtet, um anschließend den Index relativer Nähe zu errechnen. Aufgrund der bereits beschriebenen Vorgehensweise und der voraussetzenden Beziehungen des Methodennetzes, sind auch diese Werte nicht in absteigender Reihenfolge angeordnet. (A\_Meschenmoser 2019)

#### **4.3.4 Vorgehensmodell Phase 2**

Das Vorgehensmodell für Phase 2 ist in Abbildung 4-26 dargestellt und kann sowohl allgemeingültig als auch spezifisch auf die besonderen Anforderungen eines Anwenders zugeschnitten angewendet werden.

Aufgrund der Tatsache, dass jedes Unternehmen eine andere Ausgangslage besitzt, ist eine individuelle und flexible Anpassung der Methodik an die jeweiligen Anforderungen notwendig. Die Methodik kann basierend auf der Datengrundlage der Methoden-Toolbox allgemein oder für die jeweiligen Anwenderanforderungen spezifisch durchgeführt werden. Im allgemeinen Fall werden die in den Methodensteckbriefen hinterlegten Daten bezüglich Zielgrößen und Aufwand zur Bewertung herangezogen. Im spezifischen Fall erfolgt die Auswahl der Bewertungskriterien und deren Gewichtung sowie die monetäre Bewertung unternehmensspezifisch auf die Situation angepasst. Für diese angepasste Situation detailliert jeder Anwender die entsprechenden allgemeingültigen Methodensteckbriefe, um eine darauf basierende individuelle Bewertung durchzuführen. Bei einer Bewertung auf Methodenebene kann diese Bewertung auf Potentialstrangebene aggregiert werden.



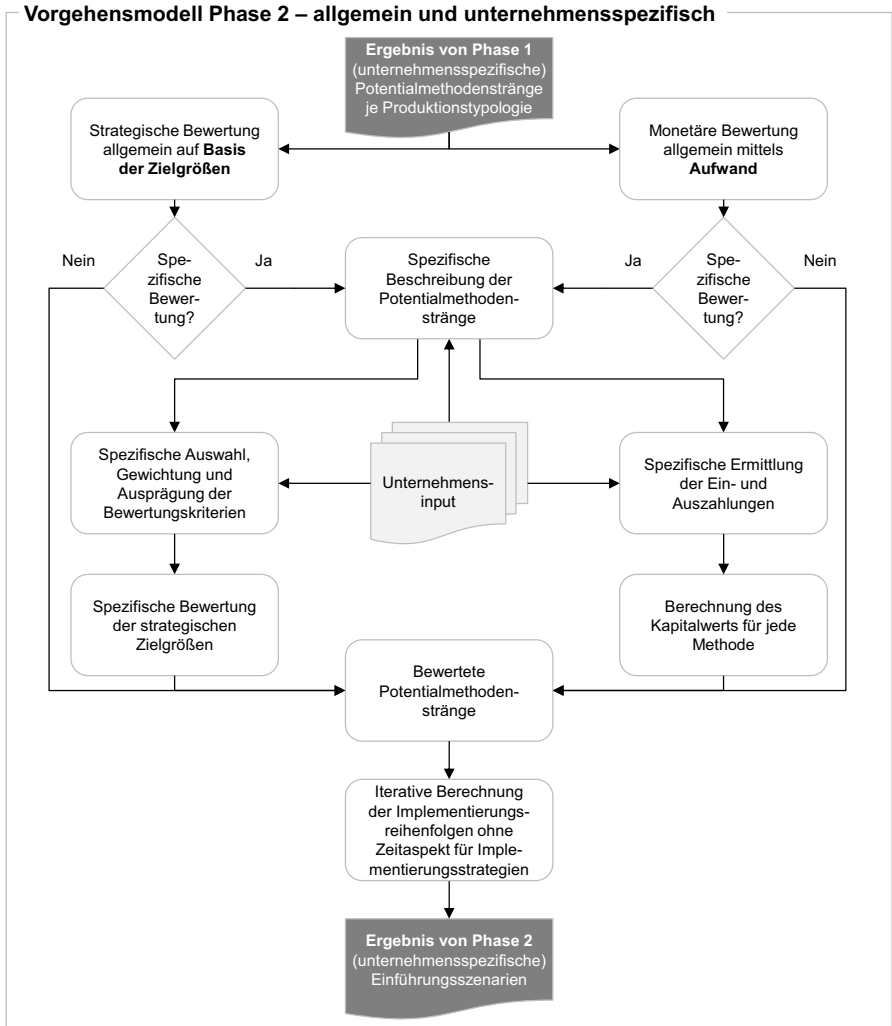


Abbildung 4-26: Vorgehensmodell Methodik Phase 2

Zu Beginn von Phase 2 führt ein Anwender auf Basis der Ergebnisse von Phase 1 die strategische und monetäre Bewertung für die ausgewählten Potentialmethodenstränge durch. Ist eine allgemeine auf den vorliegenden Methodenstreckbriefen basierende Bewertung ausreichend, kann direkt die Priorisierung der Potentialmethodenstränge für

unterschiedliche Szenarien mittels eines Bewertungstools gebildet werden. Hierbei können basierend auf den Eingangsmethodensträngen unterschiedliche Gewichtungen für die TOPSIS-Bewertung bezüglich Strategiepotential und Aufwand (im spezifischen Fall Kapitalwert) dargestellt werden. Bei dieser Art der allgemeinen Gewichtung wird die strategische Bewertung auf Basis der allgemeinen Zielgrößen und die monetäre Bewertung mit Hilfe der qualitativen Aufwandskategorien durchgeführt.

Bei der spezifischen Bewertung müssen die Potentialmethodenstränge durch den Anwender detailliert beschrieben werden. Basierend auf diesen spezifisch angepassten Potentialmethodensträngen wird die strategische und monetäre Bewertung auf Methodenebene, wie in Kapitel 4.3.1 und Kapitel 4.3.2 beschrieben, durchgeführt. Als Ergebnis von Phase 2 stehen unterschiedliche Einführungszenarien in Form von unterschiedlichen Priorisierungen der Potentialmethodenstränge. Im spezifischen Fall können die Szenarien nachträglich individuell nachjustiert werden. In Anhang F: Ablauf Bewertungstool und Simulationsmodell sind alle Schritte, die bei der Anwendung des Bewertungstools durchlaufen werden, in Form eines Ablaufplans dargestellt. Die Ergebnisse von Phase 2 dienen als Grundlage für die im nächsten Kapitel beschriebene Phase 3 der Simulation.

#### 4.4 Phase 3: Simulation von Implementierungsreihenfolgen

Ziel von Kapitel 4.4 ist es, die Implementierungsreihenfolgen von Industrie 4.0-Methoden simulativ abzuleiten. Dafür werden allgemeingültige und spezifische Modellierungsparameter definiert. Mittels einer System Dynamics Simulation werden anschließend Implementierungsreihenfolgen für Industrie 4.0-Methoden abgeleitet. Auf dieser Basis können allgemeingültige und spezifische Industrie 4.0-Roadmaps dargestellt werden.

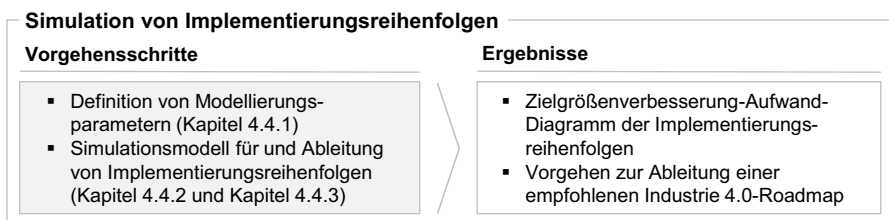


Abbildung 4-27: Vorgehen und Ergebnisse von Phase 3 der Methodik

Dies erfolgt in Anlehnung an die vom Autor angeleiteten studentischen Arbeiten A\_Lang (2019), A\_Rosenberger (2019), A\_Ross (2019), A\_Kiefer (2018), A\_Stentzel (2018) und A\_Zeranski (2017) vorgestellt.

#### 4.4.1 Definition von allgemeinen und spezifischen Modellierungsparametern

Es ist zwischen allgemeingültigen und unternehmensspezifischen Modellierungsparametern zu unterscheiden. Allgemeingültige Parameter müssen nicht unternehmensspezifisch erhoben werden. Dazu gehören exemplarisch die Beziehungen zwischen den Methoden (siehe Kapitel 4.1.2). Auch die Zielgrößen (siehe Kapitel 2.3 und Kapitel 4.3.1) lassen sich grundsätzlich universell bestimmen, können aber auch spezifisch angepasst werden. Unternehmensspezifische Parameter, die für die Aussagekraft des Simulationsmodells entscheidend sind, werden individuell ermittelt.

Der Umsetzungsgrad der Industrie 4.0-Methoden und damit die Ausgangssituation der Unternehmen unterscheiden sich naturgemäß. Ebenfalls können sich die Bewertungen der allgemeingültigen Modellierungsparameter für einzelne Unternehmen unterscheiden. Beispielsweise sind die Nutzwerte der Methoden bezüglich der einzelnen Zielgrößen zwischen den Unternehmen unterschiedlich. Die sieben relevanten Modellierungsparameter werden im Folgenden definiert.

##### 1. Aufwandskategorie

Der Implementierungsaufwand spielt als qualitative Kategorie bei der Bewertung von Produktionssystemen eine große Rolle. Die Diversität der Industrie 4.0-Methoden bedingt unterschiedliche monetäre Aufwände und Implementierungszeiten für jede Methode. Um dies zu beurteilen, werden Aufwandskategorien in Anlehnung an Merl (2016) eingeführt.

Kategorien	 Sehr Gering	 Gering	 Mittel	 Hoch
<b>Aufwandswert</b>	1	2	3	4
<b>Zeiteinheiten (z. B. in Quartalen)</b>	$1 \leq t \leq 3$	$3 < t \leq 6$	$6 < t \leq 12$	$12 < t \leq 20$

Abbildung 4-28: Aufwandskategorien (in Anlehnung an (A\_Ross 2019; Merl 2016))

Es gibt die vier Aufwandskategorien „Sehr Gering“, „Gering“, „Mittel“ und „Hoch“. Jeder Kategorie kann ein Aufwandswert und ein Zeitbereich zugeordnet werden. Die Bewertung der Aufwandskategorie findet methodenspezifisch statt. Die entsprechende Bewertungsskala ist in Abbildung 4-28 dargestellt und für jede Methode in Anhang B: Methodensteckbriefe angegeben. In der spezifischen Bewertung wird der Aufwandswert für jede Methode durch einen berechneten Kapitalwert ersetzt (siehe Kapitel 4.3.2).

## 2. Implementierungsintensitätsgradient (IIG)

Der Implementierungsintensitätsgradient (IIG) bestimmt die Wichtigkeit einer Methode für ein Anwenderunternehmen. Der Ressourcenaufwand für die Implementierung einer Methode unterscheidet sich je nach Wichtigkeit. In der Regel variiert zudem die Menge an eingesetzten Ressourcen über den Implementierungsfortschritt einer Methode. In der Planungsphase und der Optimierungsphase werden weniger Ressourcen eingesetzt als in der Entwicklungsphase. Dieser Effekt wird mittels einer Kurvenform aus drei Geraden angenähert (siehe Abbildung 4-37). (Liebrecht & Böhn et al. 2018) Die Ausprägungsstufen sind in Abbildung 4-29 abgebildet.

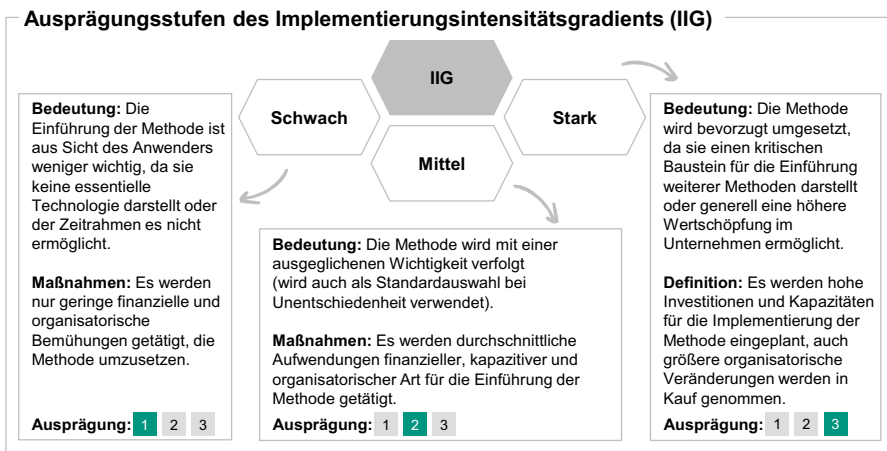


Abbildung 4-29: Implementierungsintensitätsgradient (IIG) (in Anlehnung an (Liebrecht & Böhn et al. 2018))

### 3. Technologischer Reifegrad (TRG)

Der Technologische Reifegrad bestimmt die technologische Marktreife einer Methode und ist an das Technology Readiness Level (Mankins 2009) angelehnt. Die Ausprägungsstufen sind in Abbildung 4-30 abgebildet.



Abbildung 4-30: Technologischer Reifegrad (TRG) (in Anlehnung an (A\_Ross 2019; A\_Stentzel 2018))

### 4. Umsetzungsgrad (UG)

Der Umsetzungsgrad (UG) beschreibt den aktuellen Grad der Implementierung einer Methode. Der Wertebereich reicht von 0 % bis 100 % (Liebrecht & Böhn et al. 2018). Die Einteilung in fünf unterschiedliche Ausprägungsstufen erfolgt nach dem Ansatz von Peter (2009). Die Ausprägungsstufen sind in Abbildung 4-31 abgebildet. Als Startwert wird der initiale Wert des Umsetzungsgrads bezeichnet, also der Startwert einer Methode im Simulationsmodell.

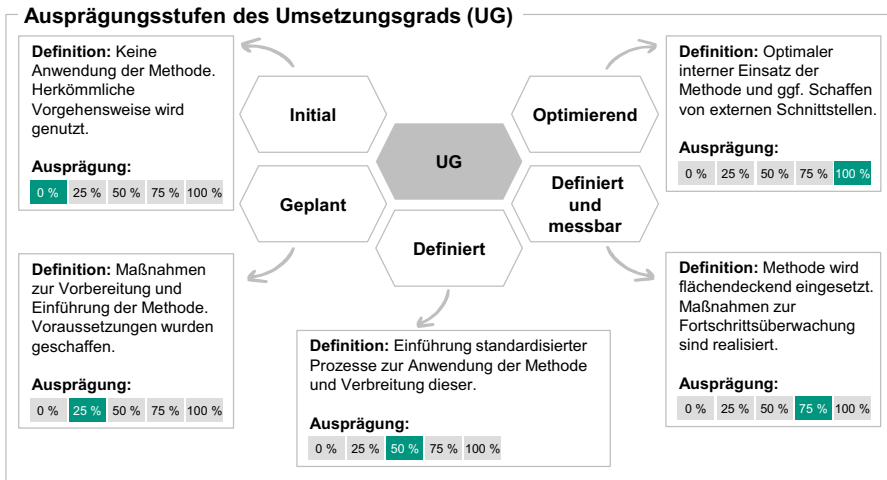


Abbildung 4-31: Umsetzungsgrad (UG)  
(in Anlehnung an (Liebrecht & Böhn et al. 2018))

### 5. Beziehungen und Unterstützungskoeffizient (UK)

Die Einführung einzelner Industrie 4.0-Methoden wird durch andere Methoden unterstützt. Der Unterstützungskoeffizient beschreibt den Einfluss unterstützender Methoden auf die Implementierungsgeschwindigkeit. Der Wertebereich liegt zwischen 0 und 1 und wird durch den Quotienten aus der Anzahl an Methoden, welche den zur Unterstützung notwendigen Schwellwert bereits überschritten haben, und der maximal möglichen Anzahl unterstützender Methoden berechnet.

$$\text{Unterstützungskoeffizient} = \frac{\text{Anzahl unterstützender Methoden}}{\text{Maximale Anzahl unterstützender Methoden}} \quad 4-4$$

Die Beziehung wurden bereits in Kapitel 4.1.2 definiert und die Interdependenzmatrix für die 60 Methoden der Toolbox ist in Anhang C: Methodenbeziehungen dargestellt.

### 6. Zielgrößenauswirkung

Alle Industrie 4.0-Methoden besitzen einen individuellen strategischen Nutzwert auf einer Skala von -3 bis +3 bezüglich jeder Zielgröße. Dieser Wert spiegelt die potentielle Auswirkung auf eine Zielgröße bei vollständiger Umsetzung der Methode wider (siehe Abbildung 4-32).

<b>Bewertungsskala der Zielgrößen</b>		
<b>Strateg. Nutzen</b>	<b>Ausprägungsstufe</b>	<b>Interpretation</b>
-3	<b>Starke Verschlechterung</b>	Durch die vollständige Umsetzung der ausgewählten Methode <b>verschlechtert</b> sich der Ausgangswert der Zielgröße <b>überdurchschnittlich</b> im Vergleich zur Einführung anderer sich negativ auswirkender Methoden.
-2	<b>Mittlere Verschlechterung</b>	Durch die vollständige Umsetzung der ausgewählten Methode <b>verschlechtert</b> sich der Ausgangswert der Zielgröße <b>durchschnittlich</b> im Vergleich zur Einführung anderer sich negativ auswirkender Methoden.
-1	<b>Geringe Verschlechterung</b>	Durch die vollständige Umsetzung der ausgewählten Methode <b>verschlechtert</b> sich der Ausgangswert der Zielgröße <b>unterdurchschnittlich</b> im Vergleich zur Einführung anderer sich negativ auswirkender Methoden.
0	<b>Kein Einfluss/ Status Quo</b>	Durch die vollständige Umsetzung der ausgewählten Methode <b>verändert</b> sich der Ausgangswert der Zielgröße <b>nicht</b> .
+1	<b>Geringe Verbesserung</b>	Durch die vollständige Umsetzung der ausgewählten Methode <b>verbessert</b> sich der Ausgangswert der Zielgröße <b>unterdurchschnittlich</b> im Vergleich zur Einführung anderer sich positiv auswirkender Methoden.
+2	<b>Mittlere Verbesserung</b>	Durch die vollständige Umsetzung der ausgewählten Methode <b>verbessert</b> sich der Ausgangswert der Zielgröße <b>durchschnittlich</b> im Vergleich zur Einführung anderer sich positiv auswirkender Methoden.
+3	<b>Sehr gute bis optimale Verbesserung</b>	Durch die vollständige Umsetzung der ausgewählten Methode <b>verbessert</b> sich der Ausgangswert der Zielgröße <b>überdurchschnittlich</b> im Vergleich zur Einführung anderer sich positiv auswirkender Methoden.

Abbildung 4-32: Bewertungsskala der Zielgrößen

Die Bewertungsskala erstreckt sich von -3 (starke Verschlechterung der Zielgröße) bis +3 (sehr gute bis optimale Verbesserung der Zielgröße) (siehe auch Kapitel 4.3.1). Dabei ist zu beachten, dass eine Verbesserung der Zielgrößen Zeit und Kosten eine Verringerung des Ausgangswerts bedeutet. Der strategische Nutzen wird zur Bewertung des Strategiepotentials in Kapitel 4.3.1 herangezogen.

Bezüglich der Anwendung im Implementierungsreihenfolgenmodell müssen die allgemeine und spezifische Anwendung unterschieden werden. Für die Bewertung der Zielgrößen Auswirkungen innerhalb der Simulation wird die Bewertungsskala in eine prozentuale Auswirkung umgerechnet. Für den allgemeinen Fall wird von einer einprozentigen Verbesserung oder Verschlechterung pro Ausprägungsstufe ausgegangen (siehe

Abbildung 4-33). Die Werte orientieren sich an den im Rahmen von Experteninterviews aufgenommenen Werten (siehe Kapitel 4.1.2).

<b>Skalen für die Zielgrößenauswirkung</b>							
<b>Zielgrößenbewertungsskala</b>	<b>-3</b>	<b>-2,9</b>	<b>...</b>	<b>0</b>	<b>...</b>	<b>+2,9</b>	<b>+3</b>
<b>Simulationsskala: Kosten, Zeit</b>	+3 %	+2,9 %	...	0 %	...	-2,9 %	-3 %
<b>Simulationsskala: Qualität, Flexibilität, Mitarbeiter</b>	-3 %	-2,9 %	...	0 %	...	+2,9 %	+3 %

*Abbildung 4-33: Bewertungsskala und Simulationsskalen für die Zielgrößenauswirkung (in Anlehnung an (A\_Ross 2019))*

Eine positive Bewertung verringert die Kosten und die Zeit und bewirkt eine Erhöhung der anderen drei Zielgrößen. Die auf diese Weise ermittelten Werte sind im allgemeinen Fall nicht als absolute Werte anzusehen, da sie nicht auf alle Unternehmensgegebenheiten angepasst sind. Sie stellen lediglich relative Verbesserungen dar und sind somit nur für den relativen Vergleich allgemeingültiger Implementierungsreihenfolgen geeignet. Im unternehmensspezifischen Fall kann die Umrechnung der Skalen angepasst und die Auswirkungen der Methoden individuell bewertet werden, sodass sich an das jeweilige Unternehmen angepasste Zielgrößenveränderungen ergeben. (A\_Ross 2019)

## **7. Maximale Anzahl parallel einzuführender Methoden**

Um die in einem Unternehmen zur Verfügung stehende Gesamtkapazität bei der Implementierung einer Industrie 4.0-Methodenauswahl zu berücksichtigen und somit einen realistischen Implementierungsprozess abzubilden, wird die maximale Anzahl parallel einzuführender Methoden festgelegt. Sind zu viele Methoden bereit für die Einführung, wird auf Basis der Beschränkung die Einführung einer oder mehrerer Methoden verzögert. Bei gleichzeitigem Start werden die Methoden mit der größten Fokuszielgrößenausprägung priorisiert. In der Simulation kann die Anzahl an parallel zu implementierenden Methoden frei gewählt werden. (A\_Ross 2019)

Die sieben vorgestellten Modellierungsparameter werden in Abbildung 4-34 gesammelt dargestellt.



**Modellierungsparameter des Simulationsmodells**

Modellierungsparameter	Beschreibung	Basis für die Bewertung	Bewertungsstufen	Ausprägung für die Simulation	
				allgemeiner Fall	unternehmensspezifischer Fall
<b>1. Zeitliche Aufwandskategorie</b>	Min/Max Implementierungsdauer	Industrie 4.0-Methode	4-stufig	allgemeingültig	Anpassung möglich
<b>2. Implementierungsintensitätsgradient (IIG)</b>	Wichtigkeit/ Geplanter Aufwand	Industrie 4.0-Methode	3-stufig	mittlere Ausprägung „2“	unternehmens-eigene Bewertung
<b>3. Technologischer Reifegrad (TRG)</b>	Technologischer Reifegrad/ Marktreife	Industrie 4.0-Methode	3-stufig & dynamisch	allgemeingültig	allgemeingültig
<b>4. Umsetzungsgrad (UG)</b>	Grad der Implementierung einer Methode	Industrie 4.0-Methode	5-stufig (Schritte von 25 %-Punkten)	Initial	unternehmens-eigene Bewertung
<b>5. Beziehungen &amp; Unterstützungskoeffizient (UK)</b>	Voraussetzungen & Einfluss durch unterstützende Methoden	Industrie 4.0-Methode (Methodenset)	variabel	Methode (Methodenset)	Methode (Methodenset)
<b>6. Zielgrößenauswirkung</b>	Auswirkung der Methode auf die jeweilige Zielgröße	Industrie 4.0-Methode	7-stufig	allgemeingültig	Anpassung möglich
<b>7. Maximale Anzahl parallel einführbarer Methoden</b>	Berücksichtigung paralleler Methoden	Unternehmen	variabel	3	frei wählbar

**Legende:**  allgemeingültige Bewertung zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit und in Methodensteckbriefen hinterlegt

Abbildung 4-34: Übersicht Modellierungsparameter (in Anlehnung an (A\_Ross 2019))

#### 4.4.2 Simulationsmodell für Implementierungsreihenfolgen

Implementierungsreihenfolgen enthalten die zeitliche Komponente bei der Einführung von Industrie 4.0-Methoden. Diese besteht aus den Implementierungsdauern und der zeitlichen Abfolge der Methoden.

### Zusammenhang zwischen Implementierungsdauer, Modellierungsparameter (IIG, TRG, UK) und Umsetzungsgrad

Wie im Abschnitt „1. Aufwandskategorie“ dargestellt, gibt es für jede Aufwandskategorie eine minimale ( $t_{min}$ ) sowie maximale ( $t_{max}$ ) Abschätzung der Implementierungsdauer. Werden die Modellierungsparameter IIG, TRG und UK mit einbezogen, können bei best- bzw. schlechtestmöglicher Parameterbewertung die besten bzw. schlechtesten Zeitwerte erreicht werden. Im Rahmen von Experteninterviews wurde ein paarweiser Vergleich für die Modellierungsparameter IIG, TRG, UK und ihren Einfluss auf die Implementierungszeit durchgeführt (siehe Abbildung 4-35).

#### Gewichtung der beeinflussenden Modellierungsparameter

Modellierungsparameter	IIG	TRG	UK
Gewichtung	43,75 %	34,38 %	21,88 %

Abbildung 4-35: Gewichtung der Modellierungsparameter IIG, TRG und UK (in Anlehnung an (A\_Rosenberger 2019; A\_Ross 2019))

Die Parameterauswirkungen errechnen sich durch Multiplikation der Gewichtung und der Parameterbewertung. Eine Bewertung von „0“ auf der Simulationsskala bedeutet ein neutrales Verhalten des Parameters, ohne Einfluss auf die Zeit. Eine Bewertung von „1“ bedeutet den maximal möglichen Einfluss.

$$\text{Parameterauswirkung} = \text{Parameterbewertung} * \text{Gewichtung} \quad 4-5$$

IIG, TRG und UK wirken positiv auf die Implementierungszeit einer Methode. Bei neutraler Bewertung aller drei Modellierungsparameter stellt sich die Basisimplementierungszeit ein. Die Basisimplementierungszeit ist gleichzeitig die maximale Implementierungsdauer.

Die Subtraktion der Parameterauswirkungen von der Basisdauer ( $t_{Basis}$ ) ergibt die für jeden Simulationsschritt erneut berechnete dynamische Implementierungszeit ( $t_{dyn}$ ).

$$t_{dyn} = t_{Basis} - \sum \text{Parameterauswirkung} \quad 4-6$$

Die Implementierungsrate entspricht dem reziproken Wert der dynamischen Implementierungszeit.

$$\text{Implementierungsrate} = \frac{1}{t_{dyn}} \quad 4-7$$

Die Implementierungsrate entspricht einer Steigerung des Umsetzungsgrads in Prozent je Zeiteinheit, bzw. Prozent je Simulationsschritt.

Verändern sich während der Implementierung die Voraussetzungen durch das Auftreten dynamischer Effekte wie Parameteränderungen oder unterstützende Methoden, so wiederholen sich die Berechnungsschritte. Der Parametereinfluss, die dynamische Implementierungszeit und die Implementierungsrate werden für diesen Fall neu berechnet.

Netland & Ferdows (2016) und Aull (2012) zeigen, dass beispielsweise die Implementierung von Lean-Methoden nicht linear verläuft. Es gibt bestimmte Phasen während der Implementierung, in denen diese schneller bzw. langsamer abläuft. Mittels Experteninterviews hat Aull (2012) festgestellt, dass die Implementierung während der Planungsphase (UG von 0-10 %) und der Optimierungsphase (UG von 80-100 %) mit nur einem Drittel der Geschwindigkeit ansteigt, verglichen mit der Entwicklungsphase (UG von 10-80 %). Dies entspricht einer angenäherten S-Kurve für die Implementierung. Auch Netland & Ferdows (2016) zeigen, dass die Steigerung der Performance in einer S-Kurve verläuft.

Es wird angenommen, dass sich diese Beobachtungen auch auf die Einführung von Industrie 4.0-Methoden übertragen lässt. Aus diesem Grund wird zur realistischeren Berechnung der Implementierungsrate ein Kurvenfaktor eingeführt (siehe Abbildung 4-36). Dieser Kurvenfaktor beeinflusst den Anstieg des UG.

#### Kurvenfaktor

Phasen	0-25 % UG	25-75 % UG	75-100 % UG
Kurvenfaktor	0,66	2	0,66

Abbildung 4-36: Kurvenfaktoren  
(in Anlehnung an (A\_Rosenberger 2019; A\_Ross 2019))

Der UG einer Methode ergibt sich aus der Summe des Umsetzungsgrads zum Zeitpunkt  $t = 0$  und dem integrierten Produkt aus Implementierungsrate und Kurvenfaktor.

$$UG = \text{Umsetzungsgrad}_0 + \int \text{Implementierungsrate} * \text{Kurvenfaktor} \quad 4-8$$

Abbildung 4-37 zeigt die S-Kurve zur Berechnung der Implementierungszeit von Industrie 4.0-Methoden und damit den Zusammenhang zwischen Implementierungsdauer, Modellierungsparametern und Umsetzungsgrad.

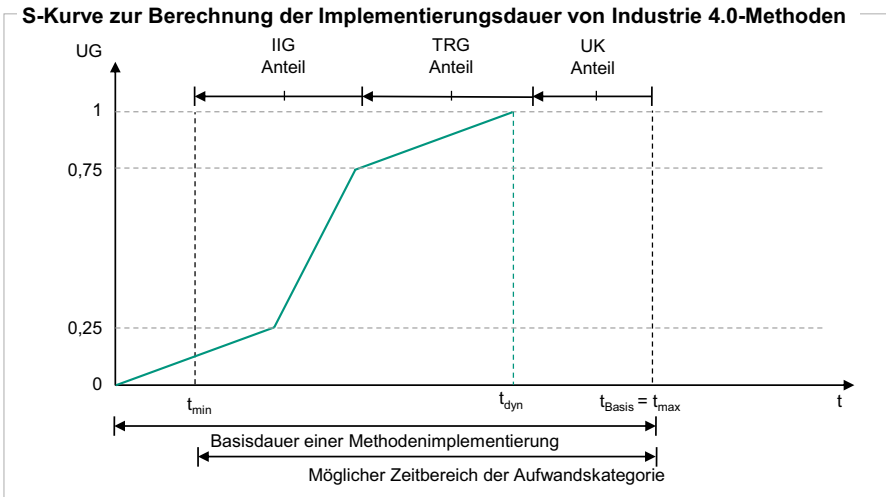


Abbildung 4-37: Zusammenhang zwischen Implementierungsdauer, Modellierungsparametern und Umsetzungsgrad  
(in Anlehnung an (A\_Rosenberger 2019; A\_Ross 2019))

### Umsetzung des Simulationsmodells

Die Wirkzusammenhänge der Modellierungsparameter sind in Abbildung 4-38 dargestellt. Im Mittelpunkt steht die dynamisch berechnete Implementierungszeit. Diese wird von den vier Modellierungsparametern Aufwandskategorie, IIG, TRG und UK beeinflusst. Während sich IIG, TRG und UK positiv auf die Implementierungszeit auswirken, führt eine höhere Aufwandskategorie zu einer größeren Implementierungsdauer. Die Implementierungsdauer nimmt Einfluss auf den Umsetzungsgrad einer Methode. Dieser setzt sich aus der Steigung im Laufe der Implementierungsdauer und dem Startwert der Methode zusammen. Der Umsetzungsgrad einer Methode hat wiederum direkten Einfluss auf die fünf Zielgrößen. Dieser kann sowohl positiv wie auch negativ sein, abhängig vom Zielgrößeneinfluss der Methode. (A\_Rosenberger 2019; A\_Ross 2019)

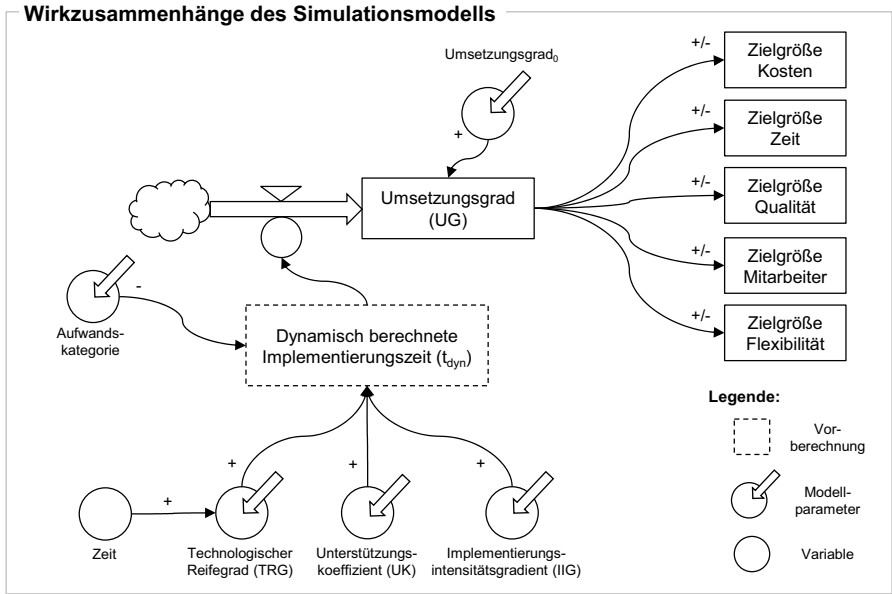
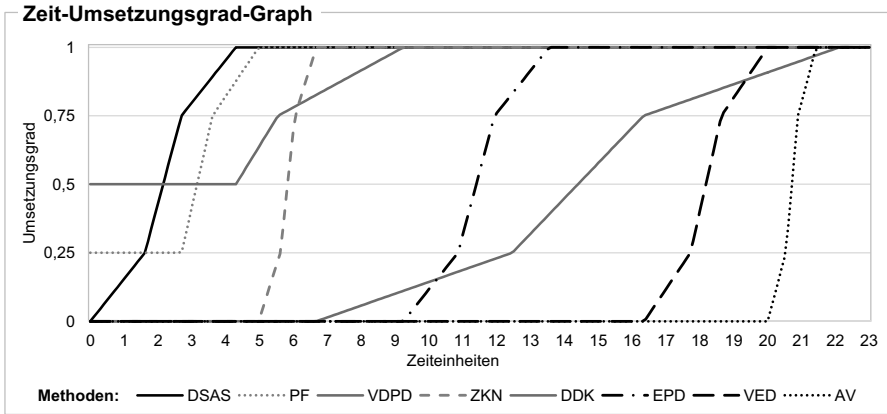


Abbildung 4-38: Wirkzusammenhänge des Simulationsmodells (in Anlehnung an (A\_Rosenberger 2019; A\_Ross 2019))

Für die Modellanwendung werden die beschriebenen Modellierungsparameter und Beziehungen der Methoden in ein agentenbasiertes System Dynamics Modell (siehe Kapitel 2.5) übertragen. System Dynamics eignet sich besonders, da die Modellierungsparameter die Implementierungsdauern der Industrie 4.0-Methoden beeinflussen und sich während der Simulation ändern. Somit ergibt sich ein dynamisches Verhalten der Implementierungsreihenfolgen. Für jede Methode wird ein Agent erstellt, mit dem die Implementierungsdauer der Methode simuliert wird und der die Verknüpfungen zu allen in Beziehung stehenden Methoden enthält. Über die Beziehungen der Methoden wird die Abfolge der Methoden bestimmt. Die Simulationsergebnisse können in einem Zeit-Umsetzungsgrad-Graph dargestellt werden.

Der Zeit-Umsetzungsgrad-Graph visualisiert die Simulationsergebnisse so, dass auf der X-Achse die Simulationsschritte und damit die Zeiteinheiten dargestellt werden. Auf der Y-Achse wird der Umsetzungsgrad der Methoden aufgetragen. Eine Beispieldarstellung ist in Abbildung 4-39 zu sehen.



*Abbildung 4-39: Beispielhafter Zeit-Umsetzungsgrad-Graph*

Für die beispielhafte Darstellung wurde der exemplarische Methodenstrang aus Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 mit verschiedenen Parameterbewertungen eingelesen und simuliert. Es werden in diesem Fall nur Methoden berücksichtigt, die einen Umsetzungsgrad < 75 % vorweisen. Die Visualisierung in dieser Weise erlaubt eine detaillierte Betrachtung des Umsetzungsgrads der Methoden und der Implementierungsreihenfolge. Es ist zu sehen, dass die Methoden zu Beginn der Implementierung unterschiedliche Umsetzungsgrade aufweisen. Außerdem ist zu erkennen, dass z. B. die „Methode Verfügbarkeit von Echtzeitdaten“ (VED) erst verzögert eingeführt wird. Dies ist auf voraussetzende Beziehungen, die Parallelitätsbeschränkung auf zwei Methoden und einem Schwellwert von 75 % in diesem Beispiel zurückzuführen. Neben den Startpunkten und dem Umsetzungsgrad kann der Fortschritt einer Methode in Form der angenäherten S-Kurven verfolgt werden. Dies erlaubt dem Unternehmen, die Start- und Endzeitpunkte der Implementierungsphasen zu ermitteln. Die unterschiedlichen Steigungen der Phasen zeigen die Auswirkungen unterschiedlicher Parameterbewertungen. (A\_Lang 2019; A\_Ross 2019)

In Anlehnung an das Projektmanagement lassen sich die Simulationsergebnisse auch in einem Gantt-Diagramm darstellen. Diese Darstellung zeigt keine Details bezüglich des Umsetzungsgrads, schafft aber Übersichtlichkeit über den Implementierungsprozess mit Fokus auf der Darstellung der Start- bzw. Endzeitpunkte einer Methodenimplementierung und der benötigten Implementierungszeit. Hinzu kommt, dass dies eine

gängige Darstellung im Projektmanagement ist und die Unternehmen bei der Einführungsplanung, insbesondere bei der Ressourcenplanung, unterstützen kann. Für diese Darstellung werden die Methoden absteigend nach dem Startzeitpunkt geordnet. So bildet sich ein zeitliches Gefälle der Methoden, welches entscheidende Abhängigkeiten verdeutlicht.

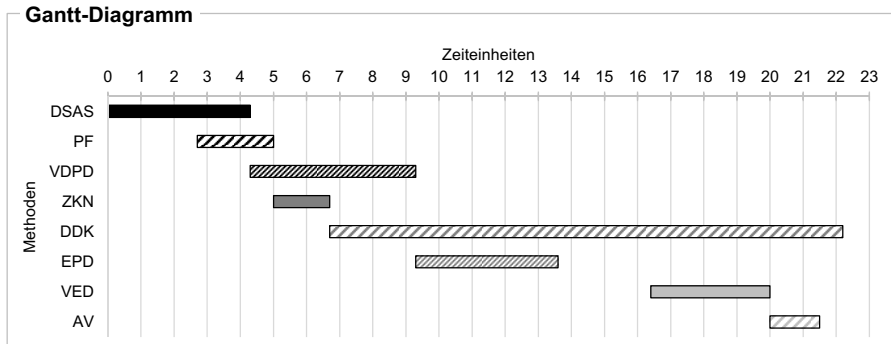


Abbildung 4-40: Beispielhaftes Gantt-Diagramm

Das beispielhafte Gantt-Diagramm zeigt dieselben Simulationsergebnisse wie der Zeit-Umsetzungsgrad-Graph in Abbildung 4-40. Diese Visualisierung ist für die Planung durch die Übersichtlichkeit geeigneter und wird daher in der Arbeit primär verwendet. Der Zeit-Umsetzungsgrad-Graph wird primär für die Modellverifizierung herangezogen.

Das Simulationsmodell selbst wird in der Simulationssoftware AnyLogic implementiert. Es werden zwei Agententypen verwendet: Im „Main-Agent“ werden alle übergeordneten Funktionen wie das Einlesen der Daten, die Berechnung der Zielgrößenveränderungen, alle methodenübergreifenden Parameter und die Datenausgabe gesteuert und die entsprechenden Systemelemente implementiert. Im Agententyp „Methode“ erfolgt die Steuerung und Berechnung des Implementierungsfortschritts. In diesem Agententyp sind alle methodenspezifischen Parameter, die Funktionen zur Berechnung des Umsetzungsgrads und die Berechnung der einzelnen Zielgrößenauswirkungen implementiert. Zu Beginn der Simulation wird die Agentenpopulation in Abhängigkeit von der Anzahl der eingelesenen Methoden erzeugt. Der detaillierte Ablauf des Simulationsmodells wird in Anhang F: Ablauf Bewertungstool und Simulationsmodell erläutert. (A\_Ross 2019)

### 4.4.3 Ableitung von Industrie 4.0-Implementierungsreihenfolgen

Die Betrachtung von Simulationsergebnissen des in Kapitel 4.4.2 erarbeiteten Modells kann bei einer großen Anzahl an Methoden in der Praxis die Analyse und Entscheidung zur Auswahl von Methodensträngen erschweren. Es sind in der Regel viele unterschiedliche Einführungszeitpunkte und variierende, sich überlagernde Zeitdauern zu unterscheiden. Werden die gleichen Methoden mit gleich bewerteten Zielgrößenauswirkungen in unterschiedlicher Reihenfolge implementiert, ergeben sich am Ende der Implementierung die gleichen Zielgrößenveränderungen. Somit eignet sich die Betrachtung der Zielgrößenveränderung nicht zum Vergleich unterschiedlicher Implementierungsreihenfolgen.

Da die Implementierungsreihenfolge der Methoden jedoch variiert, ist das Integral der Zielgrößenveränderungen unterschiedlich. Das Integral eignet sich damit besser für den Vergleich von Implementierungsreihenfolgen. Für die Berechnung des Integrals wird eine Integration der Zielgrößenverbesserung mittels Rechteckmethode nach (Munz & Westermann 2019) durchgeführt:

$$\text{Kumu. } ZGI_{\text{Veränderung}} = \sum_{i=0}^{i=\text{Implementierungsdauer}} \text{Schrittweite} * ZG_i \quad 4-9$$

Die *Schrittweite* definiert hierbei die Breite der Rechtecke, die Zeitintervalle, in die die Gesamtdauer eingeteilt wird und anhand derer die Ergebnisse berechnet werden. Die Höhe des Rechtecks zum jeweiligen Zeitpunkt ergibt sich über den zugehörigen Zielgrößenwert  $ZG_i$ . Die Gesamtauswirkung  $\text{Kumu. } ZGI_{\text{Veränderung}}$  wird durch Summieren der einzelnen Rechteckflächen berechnet.

Im Anschluss wird das Zielgrößenintegral in eine prozentuale Verbesserung umgerechnet, indem der Quotient aus dem zuvor berechneten Zielgrößenintegral und dem Integral für den Fall, dass über die komplette Laufzeit keine Veränderung der Zielgröße stattgefunden hat ( $ZG = 1$ ), gebildet wird:

$$\text{Prozentuale } ZGI_{\text{Veränderung}} = \frac{\text{Kumu. } ZGI_{\text{Veränderung}}}{\text{Kumu. } ZG_1} \quad 4-10$$

Um verschiedene Implementierungsreihenfolgen mit verschiedenen Implementierungsdauern miteinander vergleichen zu können, müssen die Integrale extrapoliert werden. Dafür muss die Implementierungsreihenfolge mit der maximalen Implementierungsdauer ermittelt werden. Die Zielgrößenintegrale werden auf die maximale Implementierungsdauer extrapoliert. (A\_Rosenberger 2019)



Beim Vergleichen der Ergebnisse lassen sich dabei erste Aussagen hinsichtlich des strategischen Potentials der verschiedenen Implementierungsreihenfolgen treffen. Beispiele hierfür sind die Ermittlung der Implementierungsreihenfolge mit dem größten Integral der Gesamtauswirkung aller Zielgrößen oder hinsichtlich des größten Integrals der Auswirkung in Bezug auf priorisierte Zielgrößen. Analog zu den Zielgrößen wird auch das Integral des durch die Einführung verursachten Aufwands berechnet. Hierbei kann zusätzlich anhand des kumulierten Aufwands die Implementierungsreihenfolge mit dem niedrigsten Gesamtaufwand identifiziert werden. (A\_Meschenmoser 2019; A\_Rosenberger 2019)

Für die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer Implementierungsreihenfolge wird wiederum das TOPSIS-Verfahren verwendet. Im spezifischen Fall bestehen die Inputparameter einerseits aus dem Gesamtkapitalwert des jeweiligen Einführungsszenarios und andererseits aus den fünf Integralen der Zielgrößenauswirkung für jede Zielgröße. Die Gewichtung der einzelnen Zielgrößenintegrale ergibt sich aus der Gewichtung der Zielgrößen im Rahmen der strategischen Bewertung (vgl. Kapitel 4.3.1). Die relative Wichtigkeit von Kapitalwert zu Zielgrößenauswirkung kann unternehmensspezifisch festgelegt werden. Anhand der Ergebnisse des TOPSIS-Verfahrens kann die empfohlene Implementierungsreihenfolge ausgewählt werden. Die Auswahl der Implementierungsreihenfolgen im allgemeinen Fall läuft analog ab. (A\_Meschenmoser 2019; A\_Rosenberger 2019)

Abschließend erfolgt für die empfohlene Implementierungsreihenfolge die Zusammenführung der Ergebnisse und die Darstellung in einer unternehmensspezifischen Industrie 4.0-Roadmap (siehe Abbildung 4-41). Diese besteht aus dem Gantt-Diagramm, der jeweiligen Implementierungsreihenfolge, der kumulierten Zahlungsströme und der Summe der Zielgrößenverbesserungen. Die unternehmensspezifische Industrie 4.0-Roadmap fasst alle entscheidungsrelevanten Ergebnisse der Bewertung zusammen und kann vom Anwender als Entscheidungsvorlage genutzt werden. Dies ist gleichzeitig das finale Ergebnis der vorgestellten Methodik. (A\_Lang 2019; A\_Meschenmoser 2019; A\_Rosenberger 2019)

**Beispielhafte spezifische Industrie 4.0-Roadmap**

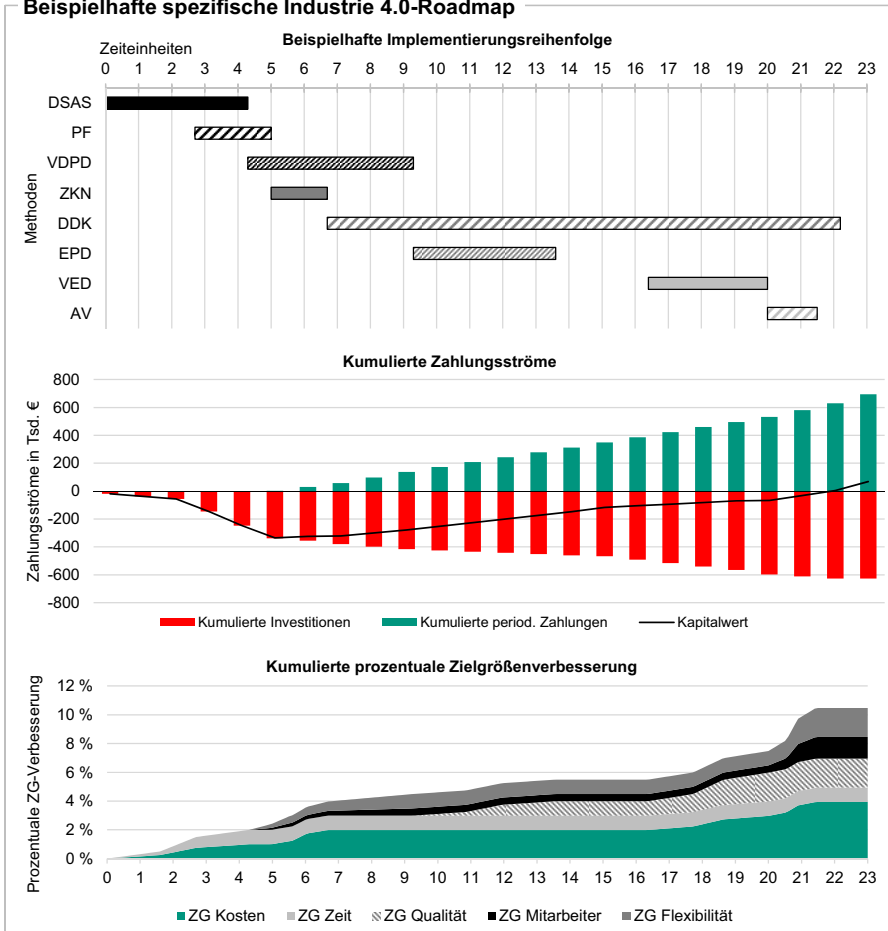


Abbildung 4-41: Beispielhafte spezifische Industrie 4.0-Roadmap (in Anlehnung an (A\_Meschenmoser 2019; A\_Rosenberger 2019; A\_Ross 2019))

### Allgemeine Anwendung

Bei der allgemeinen Anwendung wird der in Abbildung 4-25 vorgestellte Experimentierplan gewählt. Im dargestellten Fall wird als Ausgangsszenario ein Unternehmen mit durchschnittlichen Modellierungsparametern und einem Ausgangszustand, der typisch für viele KMUs ist, angenommen. Für die Modellierungsparameter bedeutet dies einen IIG von 2 sowie eine parallele Umsetzbarkeit von maximal drei Methoden. Das fiktive Unternehmen hat bisher keine Methoden implementiert. Dies entspricht einem Startwert von 0 % für alle 60 Methoden. Der Schwellwert liegt bei 75 %. Die beeinflussenden Modellierungsparameter sind wie in Abbildung 4-35 gewichtet. Eine Eingrenzung und Anpassung der Methoden-Toolbox, wie in Phase 1 beschrieben, wird nicht vorgenommen.

Zur Generierung der verschiedenen Implementierungsreihenfolgen werden fünf Implementierungsstrategien für das Strategiepotehtial sowie dem dazugehörigen Aufwand festgelegt (siehe Kapitel 4.3.4 und Abbildung 4-25) und somit 30 Szenarien simuliert. Die Ergebnisse dieses Experimentierplans sind in Abbildung 4-42 in Form eines Zielgrößenverbesserung-Aufwand-Diagramms der Szenarien dargestellt.

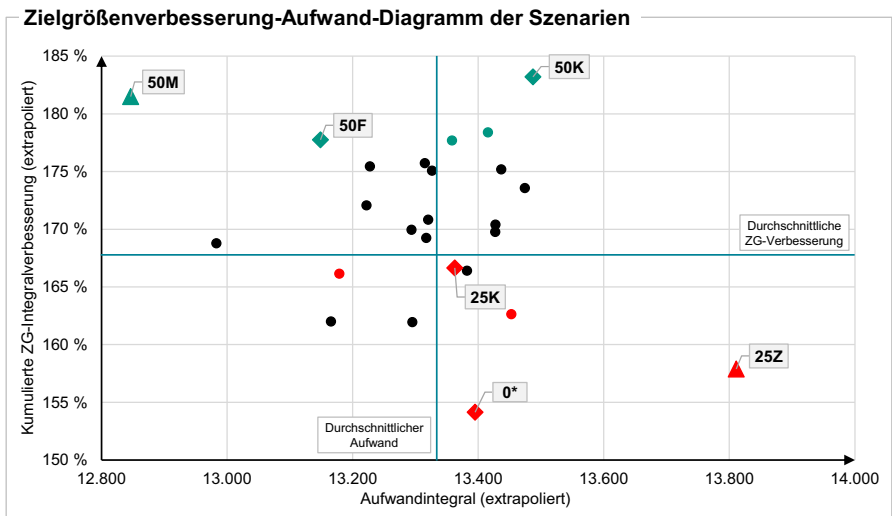


Abbildung 4-42: Simulationsergebnis des Experimentierplans im allgemeinen Fall (in Anlehnung an (A\_Lang 2019))

Für die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer Implementierungsreihenfolge wird das TOPSIS-Verfahren verwendet. Die Ergebnisse bei einer Gewichtung von 50/50 sind in Abbildung 4-43 dargestellt.

### Szenarienergebnisse unter Angabe der TOPSIS-Rangfolge

Fall-szenario	Ausgangs-situation	Implementierungs-strategie	Fokusziel-größe	Dauer	Aufwand-integral (extra-poliert)	Kumulierte ZG-Integral-verbesserung (extrapoliert)	Rang gemäß Index rel. Nähe	
100K	Umsetzungsgrad aller Methoden ist 10 %	Strategiepotential 100 %	Kosten	182,5	13315	175,7 %	6	
100Z			Zeit	187,8	13453	162,7 %	22	
100Q			Qualität	184,7	13320	170,8 %	14	
100M			Aufwand 0 %	Mitarbeiter	182,4	13228	175,4 %	7
100F			Flexibilität	185,7	13165	162,0 %	16	
100H			Holistisch	187,2	13382	166,4 %	19	
75K		Strategiepotential 75 %	Kosten	182,4	13358	177,7 %	4	
75Z			Zeit	184,3	13427	170,4 %	13	
75Q			Qualität	184,5	13327	175,1 %	8	
75M			Aufwand 25 %	Mitarbeiter	186	12983	168,8 %	9
75F			Flexibilität	186,8	13295	162,0 %	18	
75H			Holistisch	187,1	13427	169,8 %	15	
50K		Strategiepotential 50 %	Kosten	182,8	13487	183,2 %	3	
50Z			Zeit	186,8	13474	173,6 %	11	
50Q			Qualität	187	13222	172,1 %	10	
50M			Aufwand 50 %	Mitarbeiter	181,3	12847	181,5 %	1
50F			Flexibilität	178,2	13149	177,7 %	2	
50H			Holistisch	188,9	13416	178,4 %	5	
25K		Strategiepotential 25 %	Kosten	183,7	13363	166,7 %	23	
25Z			Zeit	192,1	13811	157,9 %	25	
25Q	Qualität		182,2	13437	175,2 %	12		
25M	Aufwand 75 %		Mitarbeiter	183,2	13317	169,3 %	20	
25F	Flexibilität		182,7	13179	166,1 %	21		
25H	Holistisch		181,6	13294	170,0 %	17		
0K	Strategiepotential 0 %	Kosten	188,5	13395	154,1 %	24		
0Z		Zeit	188,5	13395	154,1 %	24		
0Q		Qualität	188,5	13395	154,1 %	24		
0M		Aufwand 100 %	Mitarbeiter	188,5	13395	154,1 %	24	
0F		Flexibilität	188,5	13395	154,1 %	24		
0H		Holistisch	188,5	13395	154,1 %	24		

Abbildung 4-43: Simulationsergebnis des Experimentierplans bei Gewichtung 50/50 im allgemeinen Fall (in Anlehnung an (A\_Lang 2019))

Die empfohlene Implementierungsreihenfolge ergibt sich demnach aus Szenario 50M, gefolgt von Szenario 50F und 50K. Als nicht empfohlene Implementierungsreihenfolgen gelten das Szenario 25Z, gefolgt von allen Szenarien mit einer ausschließlichen Fokussierung auf den Aufwand.

Insgesamt lässt die Auswertung des Experimentierplans erkennen, dass die Wirkzusammenhänge innerhalb des Methodennetzes wesentlichen Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit einer Implementierungsreihenfolge haben und nur durch die Simulation eine qualifizierte Aussage getroffen werden kann. Dies gilt insbesondere auch für spezifisch bewertete Methoden, da die Entscheidung für eine empfohlene Implementierungsreihenfolge neben den Wirzusammenhängen des Methodennetzes auch ganz wesentlich von den jeweiligen errechneten Implementierungsdauern abhängt. Die Gesamtimplementierungsdauer hat wesentlichen Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit eines Falles. Es ist ein klarer Trend zu erkennen, dass kürzere Implementierungsdauern zu präferieren sind. Implementierungsreihenfolgen, die nur nach Aufwand priorisiert werden, haben jedoch nicht das geringste Aufwandsintegral über alle Szenarien gesehen. In diesen Fällen werden die Wirkzusammenhänge des Methodennetzes deutlich. Es ist möglich, dass ein Engpass entsteht, da eine Methode erst umgesetzt werden kann, wenn alle Voraussetzungen erfüllt sind. Daraus ergibt sich eine längere Implementierungsdauer.

Die empfohlene Industrie 4.0-Roadmap auf Basis des Experimentierplans ist Szenario 50M und wird in Abbildung 4-44 dargestellt. Das Szenario ist nach 181,3 Zeiteinheiten implementiert, hat ein extrapoliertes Aufwandsintegral von 12847 und eine kumulierte Zielgrößenintegralverbesserung von 181,5 %.

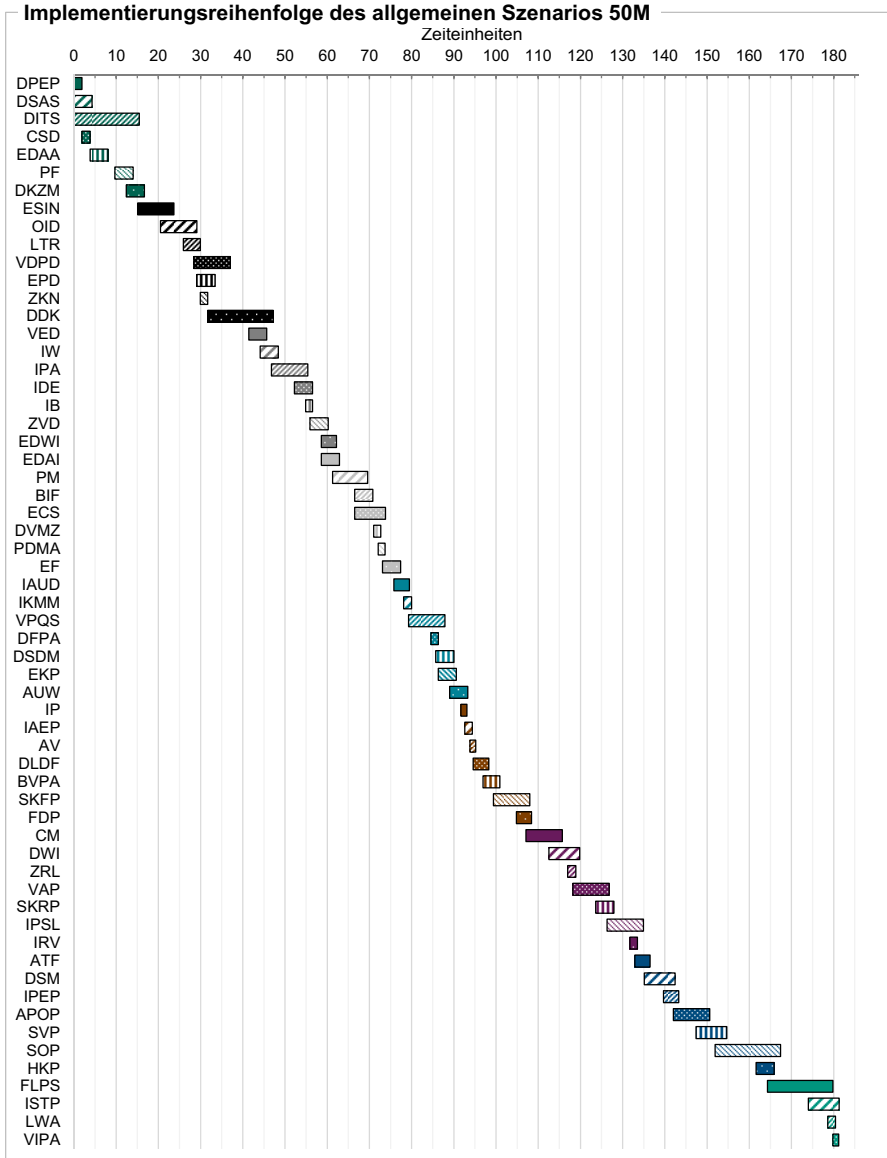


Abbildung 4-44: Empfohlene Industrie 4.0-Roadmap (in Anlehnung an (A\_Lang 2019))

### 4.4.4 Vorgehensmodell Phase 3

Das Vorgehen kann sowohl allgemeingültig als auch spezifisch auf die besonderen Anforderungen eines Anwenders angepasst werden. Das Vorgehensmodell für Phase 3 ist in Abbildung 4-45 dargestellt.

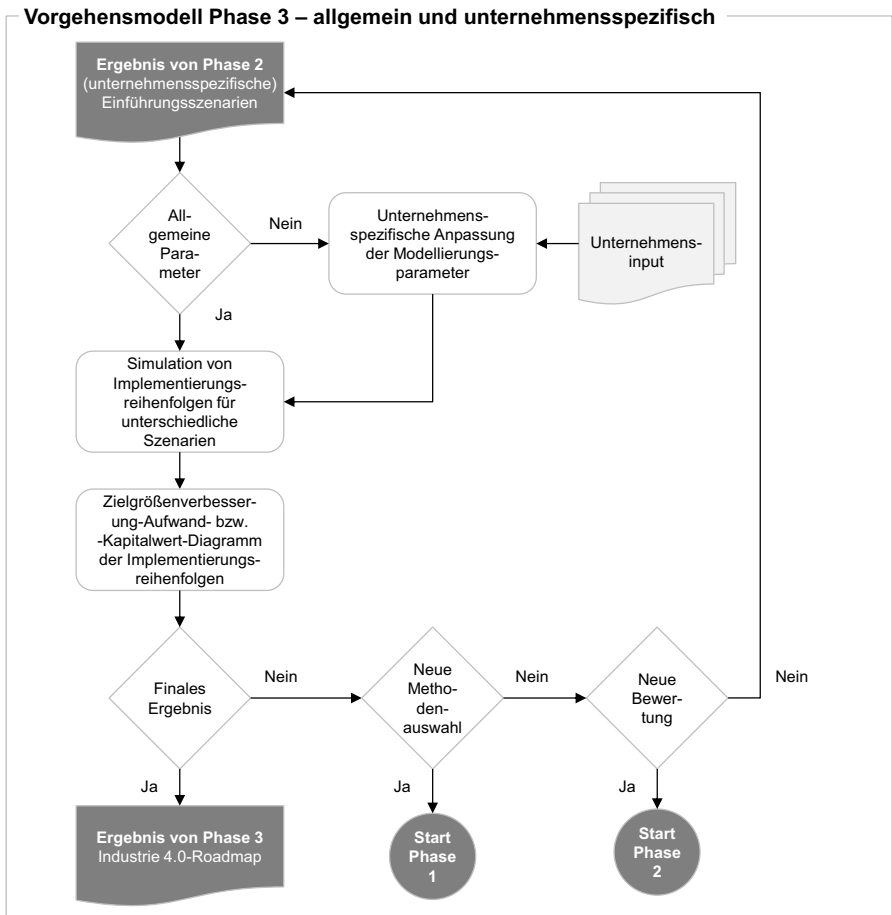


Abbildung 4-45: Vorgehensmodell Methodik Phase 3

Zu Beginn von Phase 3 wählt ein Anwender, ob die Ergebnisse von Phase 2 anhand von allgemeinen oder spezifischen Modellierungsparametern simuliert werden sollen.

Für beide Fälle erfolgt dann die Simulation von Implementierungsreihenfolgen für unterschiedliche Einführungsszenarien, im spezifischen Fall auf Basis der unternehmensspezifischen Werte. In beiden Fällen resultiert ein Zielgrößenverbesserung-Aufwand-Diagramm bzw. Zielgrößenverbesserung-Kapitalwert-Diagramm der Implementierungsreihenfolgen. Sind die Ergebnisse für einen Anwender final, kann eine allgemeine oder spezifische Industrie 4.0-Roadmap empfohlen werden. Falls nicht, kann eine neue Methodenauswahl getroffen werden. Dazu wird die Methodik wieder in Phase 1 gestartet. Ist nur die Bewertung neu durchzuführen oder sollen neue Einführungsszenarien betrachtet werden, dann kann die Methodik in Phase 2 neu gestartet werden. Sollen andere Modellierungsparameterausprägungen betrachtet werden, dann startet das Vorgehen zu Beginn von Phase 3 neu.



## 5 Exemplarische Anwendung der Methodik

Im vorliegenden Kapitel wird die praktische Erprobung der vorgestellten Methodik zur Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz erläutert. Die Methodik wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts „Befähigungs- und Einführungsstrategien für Industrie 4.0 (Intro 4.0)“ (Förderkennzeichen 02P14B161) entwickelt. Zusätzlich wurden die einzelnen Phasen der Methodik umfassend mit mehreren Industriepartnern diskutiert, bewertet und durchgeführt. Zum Nachweis der Funktionalität des entwickelten Lösungsansatzes wurde abschließend ein Demonstrator prototypisch implementiert und anhand eines industriellen Anwendungsfalls erprobt (Liebrecht & Krodell et al. 2019; Liebrecht & Krogmann et al. 2019; Liebrecht & Böhn et al. 2018; Liebrecht & Schaumann et al. 2018; Liebrecht & Jacob et al. 2017).

Die Validierung der entwickelten Methodik erfolgt beispielhaft bei einem Partnerunternehmen aus der Bahnindustrie. Untersucht wird ein Produktionsstandort zur Herstellung elektrischer Bahnkupplungen. Diese übertragen elektrische Signale und Ströme aller Leistungsklassen zwischen zwei Zugeinheiten. Jede Kupplung ist ein Einzelstück, da sowohl die Bauform, als auch der Anbringungsort und die Kontaktbestückung von Zug zu Zug variieren. Die Kupplungen sind für mindestens 30 Jahre Einsatzdauer ausgelegt. Dies erfordert in der Produktion ein extrem hohes Qualitätsniveau und stellt hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit und Robustheit der Kupplungen.

Die praktische Erprobung und prototypische Umsetzung wird in Anlehnung an die vom Autor angeleiteten studentischen Arbeiten A\_Eicken (2019), A\_Lang (2019), A\_Meschenmoser (2019), A\_Rinnewitz (2019), A\_Rosenberger (2019), A\_Ross (2019), A\_Schaumann (2019), A\_Kandler (2018), A\_Selensky (2018), A\_Teufel (2018) und A\_Tsiknas (2018) vorgestellt.

Das Vorgehen und die Ergebnisse werden im Folgenden detailliert dargestellt. Zunächst wird die praktische Erprobung auf Basis der allgemeinen Methoden-Toolbox für Industrie 4.0 (siehe Kapitel 4.1) anhand der drei Phasen der Methodik durchlaufen (Kapitel 5.1, Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3). Anschließend wird die prototypische Umsetzung des vorliegenden Lösungsansatzes erläutert (Kapitel 5.4). Das entwickelte Workshopkonzept ist Anhang G: Empfohlenes Workshopkonzept zu entnehmen.

## 5.1 Phase 1: Eingrenzung relevanter Methoden anhand der Produktionstypologie

In Phase 1 werden relevante Methoden anhand betriebstypologischer Merkmale eingegrenzt. Das Ergebnis sind Potentialmethodenstränge für eine definierte Produktionstypologie und die daraus resultierende Industrie 4.0-Vision des Anwenders.

### 5.1.1 Betriebstypologische Einordnung

Für die erste Methodeneingrenzung wird der Produktionsbereich des Anwendungspartners entsprechend der Merkmale des morphologischen Kastens (siehe Abbildung 4-12) eingestuft. Der Produktionsbereich umfasst den Bau von elektrischen Bahnkupplungen. In diesem Produktionsbereich liegt ein „hoher Anteil an manuellen Arbeitsschritten“ vor und es wird in einer Einzel- bis Kleinserienfertigung produziert. Der Fokus der Produktion liegt dabei auf einer „hohen Variantenzahl“.

#### Fokus- und Ausblicksmethoden der Typologie des Anwendungspartners

Fokusmethoden	Ausblicksmethoden
<p><b>4 Assistenzsysteme und Visualisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auftragsvisualisierung (AV)</li> <li>▪ Echtzeitfeedback (EF)</li> <li>▪ Führen durch den Prozess (FDP)</li> <li>▪ Integrierter Änderungsprozess (IAEP)</li> <li>▪ Papierlose Fertigung (PF)</li> </ul> <p><b>5 Vernetzung und Transparenz</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitale Kommunikation zw. Mitarbeitern (DKZM)</li> <li>▪ Digitales Shopfloor Management (DSM)</li> <li>▪ Intelligente Behälter (IB)</li> <li>▪ Intelligente Palette (IP)</li> <li>▪ Lokalisierung und Tracking von Ressourcen (LTR)</li> </ul> <p><b>6 Selbstorganisation und Dezentralisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Autonome Transportfahrzeuge (ATF)</li> <li>▪ Intelligente Personaleinsatzplanung (IPEP)</li> <li>▪ Intelligente Werkstücke (IW)</li> <li>▪ Selbstkonfigurierung von Produktionsanlagen (SKFP)</li> <li>▪ Selbstkorrektur von Produktionsanlagen (SKRP)</li> </ul>	<p><b>4 Assistenzsysteme und Visualisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitale Wartungsinformationen per AR (DWI)</li> <li>▪ Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen/ Werkzeugen (VIPA)</li> <li>▪ Visuelle In-Process-QS (VPQS)</li> </ul> <p><b>5 Vernetzung und Transparenz</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bedarfsgerechte Versorgung von Produktionsanlagen (BVPA)</li> <li>▪ Digitale Ferndiagnose von Produktionsanlagen (DFPA)</li> <li>▪ Digitale Layoutplanung und Digitales Fabrikmodell (DLDF)</li> <li>▪ Intelligente Produktionssteuerung und Lagerhaltung (IPSL)</li> <li>▪ Intelligente Routen durch Vernetzung (IRV)</li> <li>▪ Intelligente standortübergreifende Transportprozesse (ISTP)</li> <li>▪ Live-Wertstromanalyse (LWA)</li> <li>▪ Simulation mit virtuellen Prototypen/ Prozessen (SVP)</li> <li>▪ Virtuelles Abbild der Produktion (VAP)</li> </ul> <p><b>6 Selbstorganisation und Dezentralisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Automatische Planung und Optimierung der Produktion (APOP)</li> </ul>
<p>Legende: <b>X</b> Kategorie</p>	

Abbildung 5-1: Produktionstypologie „Fokus auf Variantenzahl bei manueller Produktion“ (in Anlehnung an (A\_Schaumann 2019))

Deshalb lässt sich der Bereich des Kupplungsbaus beim Anwendungsunternehmen der Produktionstypologie „Fokus auf Variantenzahl bei manueller Produktion“ zuordnen. Es ergibt sich für das Anwendungsunternehmen auf Basis dieser Zuordnung eine Liste von Fokus- und Ausblicksmethoden der Produktionstypologie, die in Abbildung 5-1 aufgeführt ist. Das dazugehörige Methodennetz, welches aus den Methodensträngen der Fokussmethoden der Produktionstypologie besteht, ist in Abbildung 4-14 zu sehen. Auf dieser Grundlage wird die unternehmensspezifische Anpassung des Methodennetzes durchgeführt.

### **5.1.2 Spezifische Potentialmethodenstränge in Abhängigkeit der Produktionstypologie**

Der erste Schritt bei der unternehmensspezifischen Anpassung des Methodennetzes ist die Prüfung, ob und welche Ausblicksmethoden aufgenommen werden sollen. Für den Anwendungspartner werden die Ausblicksmethoden „Automatische Planung und Optimierung der Produktion“ (APOP), „Intelligente Produktionssteuerung und Lagerhaltung“ (IPSL) und „Visuelle-In-Process-QS“ (VPQS) hinzugefügt. Außerdem werden die Methodenstränge der Ausblicksmethoden dem Methodennetz hinzugefügt. Dadurch wird das Methodennetz um die Methode „Zentrale Rechenleistung“ (ZRL) ergänzt.

Im zweiten Schritt der Anpassung wird geprüft, ob unterstützende Methoden zum Methodennetz hinzugefügt werden sollen. Im Fall des Anwendungspartners sind dies die Methoden „Aus- und Weiterbildung“ (AUW) und „Homogenisierung von Kommunikationsprotokollen“ (HKP).

Der dritte Anpassungsschritt des unternehmensspezifischen Methodennetzes ist das Eliminieren von Potentialmethoden. Im Fall des Anwendungsunternehmens werden die Methoden „Autonome Transportfahrzeuge“ (ATF), „Intelligente Routen durch Vernetzung“ (IRV), „Selbstkonfigurierung von Produktionsanlagen“ (SKFP) und „Selbstkorrektur von Produktionsanlagen“ (SKRP) entfernt. Diese Methoden sind keine Voraussetzung für andere Methoden. Durch das Entfernen der Methode IRV ist die Methode „Bedarfsgerechte Versorgung von Produktionsanlagen“ (BVPA) keine Voraussetzung mehr und wird ebenfalls aus dem Methodennetz entfernt.

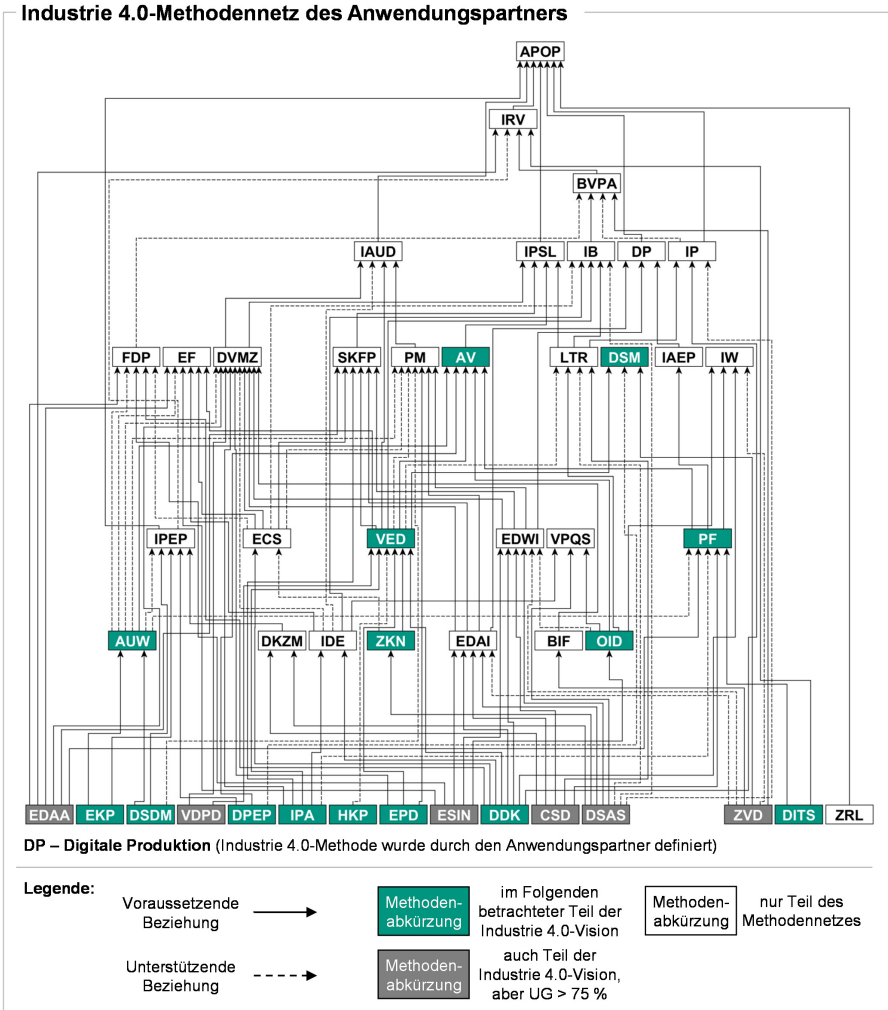


Abbildung 5-2: Industrie 4.0-Methodennetz des Anwendungspartners nach spezifischen Anpassungen (in Anlehnung an A\_Schaumann 2019)

Im vierten Anpassungsschritt werden zusätzliche Potentialmethoden aufgenommen. Der Anwendungspartner nimmt jedoch keine zusätzlichen Potentialmethoden der Methoden-Toolbox auf. Allerdings wird die Industrie 4.0-Methode „Digitale Produktion“

(DP) vom Anwendungspartner neu definiert und hinzugefügt. Dadurch müssen die Methodenbeziehungen des Netzes angepasst und auf mögliche Redundanzen geprüft werden.

Im Anschluss werden im fünften Schritt sonstige Anpassungen durchgeführt. Dazu zählen vor allem das Angleichen der Methodenbeziehungen. Dies muss an mehreren Stellen erfolgen, um das Methodennetz des Anwendungspartners nachzubilden. Zum Beispiel wird definiert, dass die Methode DP eine Voraussetzung für die Methode APOP ist. Weitere Anpassungen wie zum Beispiel das Entfernen von Methoden, die nun keine Voraussetzungen mehr sind, müssen für den vorliegenden Fall nicht vorgenommen werden.

Das so unternehmensspezifisch angepasste Industrie 4.0-Methodennetz des Anwendungspartners ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Aus Kapazitätsgründen wird beim Anwendungspartner entschieden, dieses Netz weiter zu reduzieren und das Methodennetz somit zu verkleinern. Deshalb werden iterativ Potential- und Grundlagenmethoden entfernt, die keine Voraussetzungen darstellen, sodass nur noch die beiden Potentialmethoden „Auftragsvisualisierung“ (AV) und „Digitales Shopfloor Management“ (DSM) im Netz enthalten sind. Zusätzlich werden alle Grundlagenmethoden ohne Voraussetzung entfernt, denen ein Umsetzungsgrad von  $> 75\%$  zugewiesen wurde. Dies ist damit zu begründen, dass diese bereits zu einem ausreichenden Grad umgesetzt worden sind und deshalb nicht mehr in einer Implementierungsplanung berücksichtigt werden müssen. Diese Änderungen stellen den dritten und fünften Schritt der Netzanpassung dar und können zwischen der Definition der Industrie 4.0-Vision und der finalen Abstimmung der Vision durchgeführt werden.

Die finale Industrie 4.0-Vision des Anwendungspartners ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Diese Vision besteht aus 15 Industrie 4.0-Methoden. Die Methoden sind bereits zu einem unterschiedlichen Grad umgesetzt. Hervorzuheben ist die Methode „Papierlose Fertigung“ (PF). Diese wurde als Industrie 4.0-Pilotanwendung beim Anwendungspartner frühzeitig eingeführt. Die notwendigen Voraussetzungen wurden nur zum Teil berücksichtigt und damit nicht alle Potentiale dieser Methode ausgeschöpft.

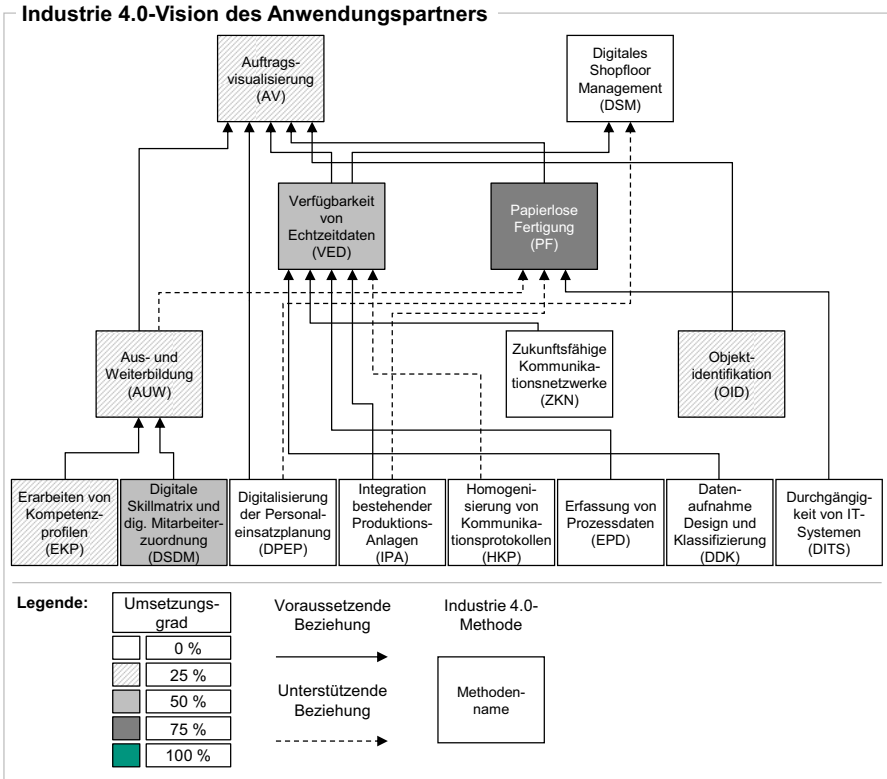


Abbildung 5-3: Industrie 4.0-Vision des Anwendungspartners (in Anlehnung an (A\_Eicken 2019; A\_Meschenmoser 2019; A\_Rinnewitz 2019; A\_Schaumann 2019; A\_Kandler 2018))

Alle Methoden und die dazugehörige Interdependenzmatrix für den Anwendungsfall sind in Anhang H: Falldaten Anwendungsfall aufgeführt.

## 5.2 Phase 2: Bewertung von Potentialmethodensträngen

In Phase 2 werden die für die Industrie 4.0-Vision des Anwendungspartners identifizierten Methoden hinsichtlich strategischer Zielgrößen und des monetären Aufwands bewertet und Einführungsszenarien mit priorisierten Potentialmethodensträngen abgeleitet.

Vor der detaillierten Bewertung ist es notwendig, die allgemeinen Methodensteckbriefe der Industrie 4.0-Vision des Anwendungspartners an die unternehmensspezifischen Bedingungen anzupassen. Die inhaltliche Beschreibung folgt den vier Kategorien „Konzept und Umfang“, „Funktionalität“, „Realisierung und Umsetzung“ und „Erwartete Verbesserungen“. Exemplarisch ist in Abbildung 5-4 der ausgearbeitete Steckbrief der Methode „Papierlose Fertigung“ dargestellt. Alle 15 Industrie 4.0-Methoden der Industrie 4.0-Vision des Anwendungspartners liegen in dieser Form vor.

<b>Papierlose Fertigung beim Anwendungspartner</b>	
<p><b>Konzept und Umfang</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitalisierung der Arbeitsplätze und Einführung einer papierlosen Fertigung im gesamten Produktionsbereich</li> </ul>	
<p><b>Funktionalität</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Darstellung von Konstruktionszeichnungen in aktueller Version (inkl. Änderungsmanagement und Beachtung des Dokumentenstatus (aktiv/inaktiv)) wird ermöglicht.</li> <li>▪ Möglichkeit der Dokumentation über verwendete Dokumente und Chargen ist gegeben.</li> <li>▪ Konstruktionsfeedback kann durch Produktion/Konstruktion/Projektierung (bspw. für Dokumente, Verbesserungsvorschläge, Änderungen, Optimierungsideen, bei fehlendem WKZ/Montagehilfen) gegeben werden.</li> <li>▪ Montagehilfe durch digitale Markierungen gegeben.</li> <li>▪ Ein Wartungsmodul zur Organisation von Maschinenwartungen wird eingerichtet.</li> </ul>	<p><b>Realisierung und Umsetzung</b></p> <p><b>Umsetzung und Kosten:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einführung im Kupplungsbereich und in Kabelkonfektion &amp; Schaltschrankbau.</li> <li>▪ Ausstattung jedes Montagearbeitsplatzes mit Bildschirmen und PF-Clients sowie Ausstattung Fertigungssteuerung und aller am Änderungsmanagement beteiligten Personen mit Clients.</li> <li>▪ Anzeige aller Fertigungsdokumente digital, Abruf automatisch über auf Fileserver hinterlegten Dokumenten.</li> <li>▪ Einführung eines digitalen Änderungsmanagements (Vorschläge am Bildschirm tätigen, Workflows unterstützen die Bearbeitung, Einbindung aller beteiligter Abteilungen).</li> <li>▪ Anbindung an ERP-System FastP → Erweiterung des Moduls PT10w. Anzeige digitaler Prüfprotokolle &amp; Einträgen von Messwerten durch MA am PC, Abruf und Anzeige benötigter Arbeitsanweisungen per Knopfdruck über Verknüpfung mit WinLinks in FastP.</li> </ul> <p><b>Benötigte interne Ressourcen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Externes Planungspersonal</li> <li>▪ Programmierung</li> <li>▪ Internes Planungspersonal</li> <li>▪ Schulung</li> <li>▪ Hardware (Bildschirme &amp; Computer)</li> <li>▪ Laufende Kosten: Pflege, Support = 10 % der Initialkosten</li> </ul>
<p><b>Erwartete Verbesserungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Personaleinsparung und Durchlaufzeitreduzierung (Wegfall von Drucken und Verteilen der Fertigungsaufträge, Reduktion der Nachfragen zu Änderungen, Suchaufwand der Dokumente sinkt): pessimistisch: 62.000*2 €/Jahr   mittel: 70.000*2 €/Jahr   optimistisch: 80.000*2 €/Jahr</li> <li>▪ Geringerer Ausschuss und weniger Reklamationen durch aktuelle Dokumente und digitales Änderungsmanagement: 5 % aller Aufträge Reklamation, Nacharbeit pro Auftrag 1 Std.</li> </ul>	

*Abbildung 5-4: Spezifischer Steckbrief der Methode „Papierlose Fertigung“ (in Anlehnung an (A\_Eicken 2019; A\_Meschenmoser 2019; A\_Rinnewitz 2019; A\_Schaumann 2019; A\_Kandler 2018))*

Die spezifische Beschreibung der Steckbriefe zeigt, dass der allgemeingültige Inhalt der Methodensteckbriefe flexibel an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden kann. Dieser Schritt ist für das weitere Vorgehen notwendig, da er ein einheitliches Verständnis aller Beteiligten fördert sowie die Datengrundlage schafft. Erst auf Basis eines einheitlichen Verständnisses der Experten beim Anwendungspartner wird eine aussagekräftige und zuverlässige Bewertung ermöglicht.

### 5.2.1 Strategische und monetäre Bewertung

Auf Grundlage des strategischen Bewertungskatalogs (siehe Abbildung 4-17 und Anhang E: Kriterienkatalog) werden in einem Initialisierungsworkshop mit dem Anwendungspartner 18 Bewertungskriterien identifiziert. Die ausgewählten Bewertungskriterien sind in Abbildung 5-5 dargestellt.



*Abbildung 5-5: Ausgewählte Kriterien des Anwendungspartners (in Anlehnung an (A\_Willhelm 2019; A\_Tsiknas 2018))*

Auf Basis der Kriterienauswahl wird mittels AHP und eines paarweisen Vergleichs die relative Wichtigkeit der jeweiligen Zielgrößen und der strategischen Bewertungskriterien durch Expertenworkshops beim Anwendungspartner bestimmt. Qualität und Kos-



ten sind die wichtigsten Zielgrößen. Um das Strategiepotehtial jeder Methode zu ermitteln, werden in weiteren Expertenworkshops die Kriterienausprägungen mittels NWA bewertet. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 5-5 dargestellt.

Abbildung 5-6 stellt den relativen Anteil der Methoden der Industrie 4.0-Vision des Anwendungspartners am Strategiepotehtial dar. Die beiden Potentialmethoden „Auftragsvisualisierung“ (AV) und „Digitales Shopfloormanagement“ (DSM) sind für den Anwendungspartner strategisch am wichtigsten. Die beiden Grundlagenmethoden „Zukunftsfähigkeit von Kommunikationsnetzwerken“ (ZKN) und „Verfügbarkeit von Echtzeitdaten“ (VED) folgen knapp dahinter. Diese beiden Methoden sind Grundlagenmethoden von Industrie 4.0 und von elementarer Bedeutung für eine mögliche Erweiterung der bestehenden Industrie 4.0-Lösung. Hier zeigt sich die Stärke der zweidimensionalen Bewertung. Eine rein monetäre Bewertung dieser Methoden fällt wahrscheinlich negativ aus, da diese wenig oder keine direkten Ersparnisse einbringen. Durch die hohe strategische Bedeutung der Methoden ist eine Einführung trotzdem gerechtfertigt. Die Gewichtung zwischen strategischer und monetärer Bewertung wird beim Anwendungspartner mit 70 % zu 30 % angenommen. Die Ergebnisse sind in Anhang H: Falldaten Anwendungsfall aggregiert dargestellt.

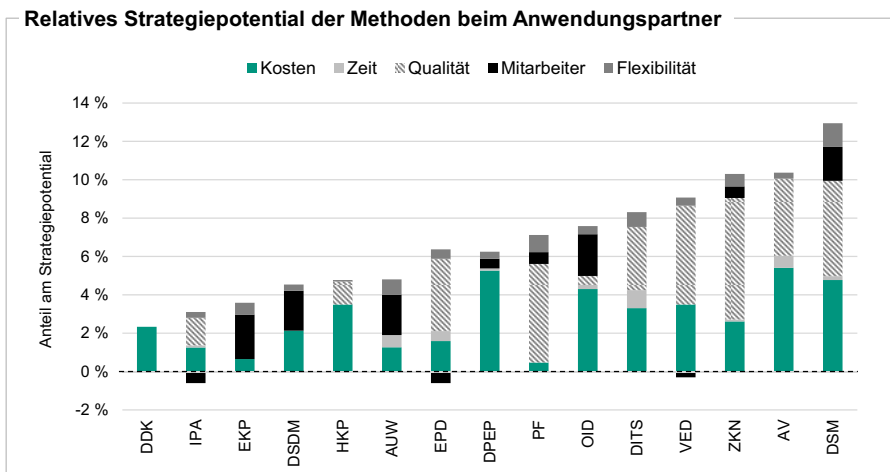


Abbildung 5-6: Relatives Strategiepotehtial der Methoden (in Anlehnung an (A\_Meschenmoser 2019))

Zur Unterstützung der monetären Bewertung werden zunächst die internen Kostensätze ermittelt. Diese umfassen in erster Linie Personalkostensätze, die sich in Stundensätze für externes Planungspersonal, Montagemitarbeiter, Mitarbeiter der Fertigungsplanung und Qualitätssicherung sowie in die Stundensätze des Führungsteams, der Projektierung und der Geschäftsleitung unterteilen lassen. Zusätzlich werden die Kostensätze für Maschinen- und Rüstkosten und die Kapitalkosten in Form des unternehmensinternen Diskontierungsfaktors ermittelt. Diese Kostensätze dienen als Grundlage zur Bildung der Berechnungsvorschriften aus der internen Kostenrechnung.

Im Rahmen der monetären Bewertung beim Anwendungspartner wird zusätzlich die Expertise eines Herstellers von Produktionsplanungs- und Steuerungssoftware herangezogen. Anhand der Kosteneinschätzung seitens der Experten werden die Zahlungshöhen für alle Softwareprojekte innerhalb der Industrie 4.0-Lösung abgeschätzt.

Die Ermittlung der Zahlungshöhen erfolgt auf Basis der unternehmensspezifischen Methodensteckbriefe. Für unsichere Zahlungsströme wird das Drei-Punkte-Schätzverfahren angewendet. Für die Berechnung des Kapitalwertes wird ein Betrachtungszeitraum von fünf Jahren und ein Diskontierungssatz von 2 % angenommen. Die Berechnung des Kapitalwertes erfolgt damit für jede bewertete Methode für den gleichen Betrachtungszeitraum, unabhängig von der tatsächlichen Implementierungsdauer. Die einmaligen Ausgaben werden nicht diskontiert, da angenommen wird, dass diese direkt zu Beginn der Investition anfallen.

In Abbildung 5-7 ist die Potentialmethode „Papierlose Fertigung“ (PF) exemplarisch hinsichtlich ihres Kapitalwertes dargestellt.

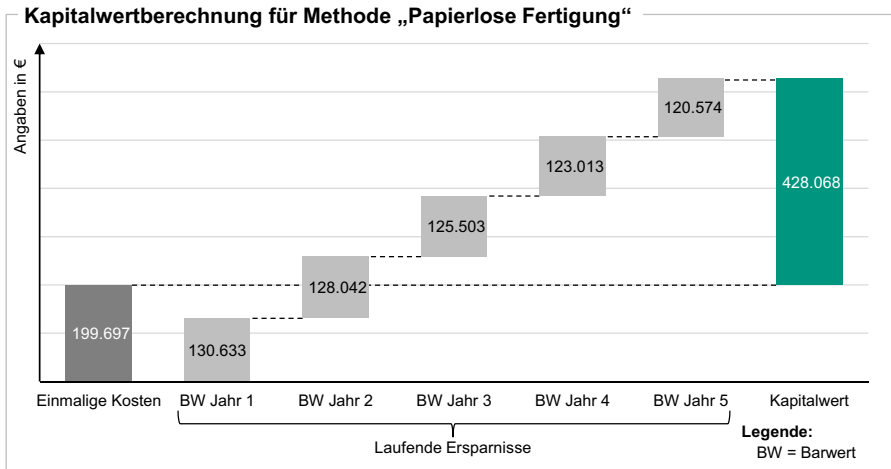


Abbildung 5-7: Kapitalwertberechnung (in Anlehnung an (A\_Lang 2019; A\_Meschenmoser 2019))

Die Kapitalwerte aller weiteren Methoden sind in Anhang H: Falldaten Anwendungsfall aufgeführt. Die Methode „Papierlose Fertigung“ (PF) benötigt zu Beginn der Implementierung Investitionen über 199.697 Euro und bringt ab dem ersten Jahr laufende Ersparnisse von 130.633 Euro ein. Auf fünf Jahre abgezinst ergibt sich so ein Kapitalwert von 428.068 Euro. Dies entspricht in diesem Fall einer Amortisationszeit von weniger als zwei Jahren. Die einmaligen Kosten gliedern sich im Wesentlichen in internen Personalaufwand, externes Planungspersonal, Kosten für die Schulung der Mitarbeiter, Hardwarekosten für Bildschirme und Softwarekosten. Die Ersparnisse werden durch die Reduktion der Personalkosten durch schlankere Prozesse dargestellt. Zusätzlich rechnen die Experten des Anwendungspartners mit einer Qualitätssteigerung durch die Möglichkeit der genaueren Dokumentation. Die Berechnung des Kapitalwertes erfolgt dabei unabhängig von der tatsächlichen Implementierungsdauer und eventuellen Wirkzusammenhänge mit anderen Methoden.

Eine Übersicht aller bewerteten Methoden ist in Abbildung 5-8 und in Anhang H: Falldaten Anwendungsfall aufgeführt. Die Potentialmethoden weisen mit Abstand die höchsten Kapitalwerte aus. Die Methode „Auftragsvisualisierung“ (AV) ist mit 1,17 Mio. Euro aus monetärer Sicht die beste Methode, dicht gefolgt vom „Digitalen Shopfloor-Management“ (DSM) mit einem Kapitalwert von 1,11 Mio. Euro.

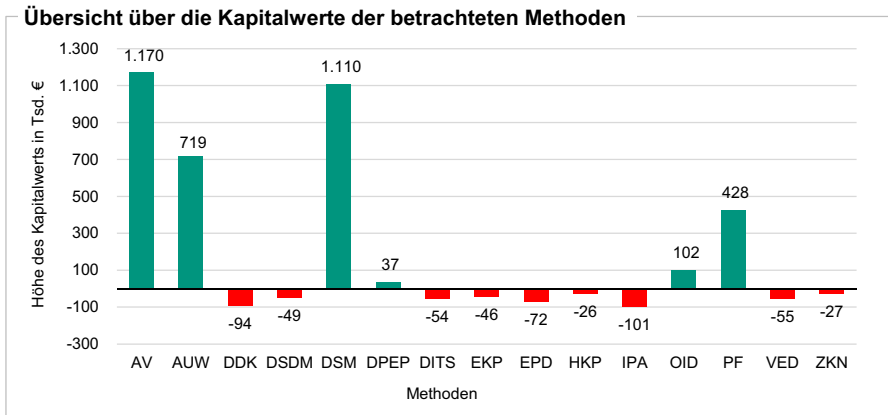


Abbildung 5-8: Kapitalwerte der betrachteten Methoden (in Anlehnung an (A\_Lang 2019; A\_Meschenmoser 2019))

Dieses Ergebnis bestätigt die Definition von Potentialmethoden. Um Potentialmethoden einführen zu können, müssen jedoch zunächst die Grundlagenmethoden umgesetzt werden, die voraussetzend sind, aber meist keine monetären Verbesserungen bewirken.

Es ist zu beachten, dass sich die Kapitalwerte nach jeder Iteration entsprechend der Neubewertung ändern. Außerdem sind die gezeigten Werte in diesem Schritt noch nicht aggregiert, das heißt, die monetären Werte sind auf Methodenbasis dargestellt. Im nächsten Schritt erfolgt die Aggregation auf Strangebene. Eine Methode kann nur Ersparnisse erzielen, wenn alle voraussetzenden Methoden bereits umgesetzt sind.

### 5.2.2 Einführungsszenarien mit priorisierten Potentialmethodensträngen

Im nächsten Schritt werden 30 verschiedene Einführungsszenarien durch unterschiedliche Priorisierung von Potentialmethodensträngen generiert. Die Industrie 4.0-Vision des Anwendungspartners besteht nur aus drei Potentialmethoden. Deshalb ergeben sich bei der Rangfolgenbildung gleiche Reihenfolgen. Im vorliegenden Fall sind 15 der 30 möglichen Reihenfolgen identisch, sodass insgesamt nur 15 unterschiedliche Einführungsszenarien vorliegen. Alle 30 Einführungsszenarien werden in Phase 3 simuliert.

### **5.3 Phase 3: Simulation von Implementierungsreihenfolgen**

In Phase 3 werden basierend auf den gebildeten Einführungsszenarien simulativ Implementierungsreihenfolgen und eine empfohlene Industrie 4.0-Roadmap für den Anwendungspartner abgeleitet.

#### **5.3.1 Annahmen für das Simulationsmodell beim Anwendungspartner**

Für die spezifische Anwendung des System Dynamics Modells (siehe Kapitel 4.4.2) müssen die Modellierungsparameter beim Anwendungspartner erhoben werden. Für jede Methode der Industrie 4.0-Vision wird im Rahmen von Experteninterviews der Implementierungsintensitätsgradient (IIG) bewertet. Außerdem werden die vordefinierten allgemeinen Ausprägungen des technologischen Reifegrads (TRG) und Unterstützungskoeffizient (UK) bestätigt. Darauf aufbauend wird die Gewichtung dieser drei Modellierungsparameter innerhalb des System Dynamics Modell ermittelt. Durch einen paarweisen Vergleich wird der IIG mit 66,67 % als signifikant wichtiger bewertet als der TRG und der UK, die mit jeweils 16,67 % gewichtet werden. Als weiterer Modellierungsparameter wird die maximale Anzahl der parallel implementierbaren Methoden auf 3 gesetzt, da der Anwendungspartner aus kapazitiven Gründen nicht mehr als drei Projekte gleichzeitig durchführen möchte. Der Schwellwert, ab der eine voraussetzende Beziehung erfüllt ist, liegt bei > 75 %. Jedes Zeitintervall entspricht einem Quartal.

#### **5.3.2 Empfohlene Industrie 4.0-Roadmap**

Als Ergebnis der dritten Phase werden die 30 Szenarien mit den jeweiligen Implementierungsreihenfolgen analysiert und verglichen. Dieser Vergleich basiert auf dem Verhältnis zwischen der extrapolierten Summe der Zielgrößenintegralverbesserung und des extrapolierten Kapitalwerts. Alle Simulationsergebnisse des Experimentierplans sind in Abbildung 5-9 dargestellt. Um eine empfohlene Industrie 4.0-Roadmap zu identifizieren, wird das TOPSIS-Verfahren eingesetzt. Das TOPSIS-Verfahren berücksichtigt sechs Dimensionen, eine für jede Zielgröße und eine für die monetäre Perspektive. Die extrapolierte Summe der Zielgrößenverbesserung wird durch Addition aller fünf strategischen Dimensionen zu einer vereinfacht.

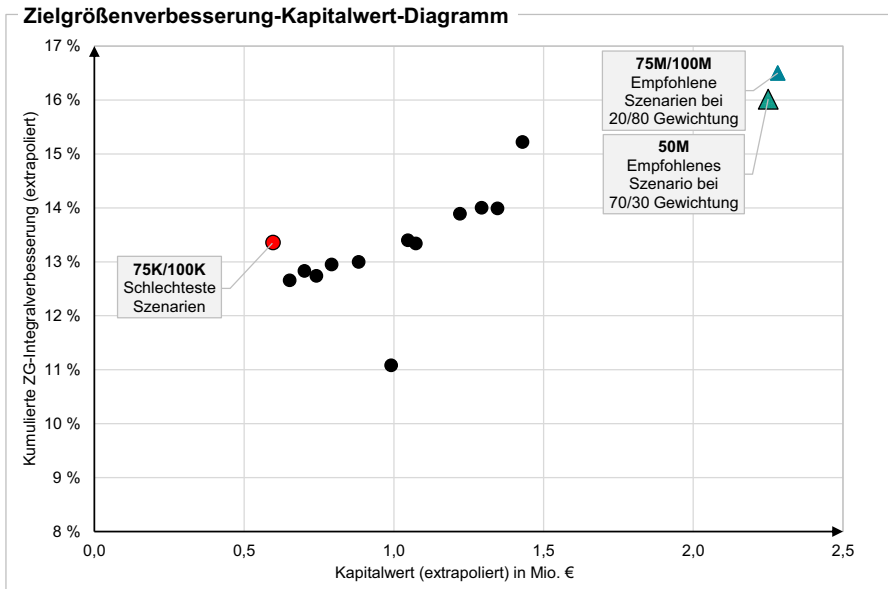


Abbildung 5-9: Simulationsergebnis des Experimentierplans des Anwendungspartners (in Anlehnung an (A\_Lang 2019))

Im Falle einer 20/80 Gewichtung sind die empfohlenen Szenarien 75M und 100M. Bei der vom Anwendungspartner gewählten Gewichtung 70/30 sind die Szenarien 75M und 100M trotz ihres höheren extrapolierten Kapitalwerts und der größeren kumulierten Zielgrößenintegralverbesserung hinter dem Szenario 50M priorisiert. Dies ist im Anwendungsfall vor allem auf die stark gewichtete Zielgröße Qualität zurückzuführen. Die Potentiale dieser Zielgröße werden im Szenario 50M früher umgesetzt. (A\_Lang 2019)

Abbildung 5-10 zeigt den vollständigen Experimentierplan des Anwendungspartners für die gewählte Gewichtung 70/30. In diesem Fall ist das Szenario 50M die empfohlene Industrie 4.0-Roadmap. Dieses Szenario hat einen extrapolierten Kapitalwert von 2.249.746 Euro und eine kumulierte Zielgrößenintegralverbesserung von 16,0 %. Die Implementierungsdauer beträgt 39,8 Quartale (d. h. ~ 10 Jahre). Die Fokuszielgröße ist „Mitarbeiter“, bei einer gleichgewichteten Implementierungsstrategie.

Szenarienergebnisse unter Angabe der TOPSIS-Rangfolge							
Fall-szenario	Ausgangs-situation	Implementierungs-strategie	Fokusziel-größe	Dauer	Kapitalwert (extrapoliert)	Kumulierte ZG-Integral-verbesserung (extrapoliert)	Rang gemäß Index rel. Nähe
100K	Die spezifische Ausgangssituation des Anwendungspartners wurde erfasst und für alle Szenarien übernommen	Strategiepotential 100 %  Kapitalwert 0 %	Kosten	40,5	596.406 €	13,4 %	15
100Z			Zeit	41,1	990.878 €	11,1 %	9
100Q			Qualität	38,8	1.047.120 €	13,4 %	8
100M			Mitarbeiter	40	2.281.958 €	16,5 %	2
100F			Flexibilität	39,8	1.292.851 €	14,0 %	5
100H			Holistisch	40,1	791.960 €	13,0 %	11
75K		Strategiepotential 75 %  Kapitalwert 25 %	Kosten	40,5	596.406 €	13,4 %	15
75Z			Zeit	41,1	990.878 €	11,1 %	9
75Q			Qualität	38,8	1.073.523 €	13,3 %	7
75M			Mitarbeiter	40	2.281.958 €	16,5 %	2
75F			Flexibilität	39,3	1.345.547 €	14,0 %	4
75H			Holistisch	40,4	701.223 €	12,8 %	13
50K		Strategiepotential 50 %  Kapitalwert 50 %	Kosten	40,4	701.223 €	12,8 %	13
50Z			Zeit	39,8	882.041 €	13,0 %	10
50Q			Qualität	40,6	651.574 €	12,7 %	14
50M			Mitarbeiter	39,8	2.249.746 €	16,0 %	1
50F			Flexibilität	40,4	741.000 €	12,7 %	12
50H			Holistisch	40,4	701.223 €	12,8 %	13
25K		Strategiepotential 25 %  Kapitalwert 75 %	Kosten	40,4	701.223 €	12,8 %	13
25Z			Zeit	40,4	701.223 €	12,8 %	13
25Q			Qualität	40,4	741.000 €	12,7 %	12
25M			Mitarbeiter	39,3	1.220.820 €	13,9 %	6
25F			Flexibilität	40,4	741.000 €	12,7 %	12
25H			Holistisch	40,4	701.223 €	12,8 %	13
0K		Strategiepotential 0 %  Kapitalwert 100 %	Kosten	42,3	1.429.530 €	15,2 %	3
0Z			Zeit	42,3	1.429.530 €	15,2 %	3
0Q			Qualität	42,3	1.429.530 €	15,2 %	3
0M			Mitarbeiter	42,3	1.429.530 €	15,2 %	3
0F	Flexibilität		42,3	1.429.530 €	15,2 %	3	
0H	Holistisch		42,3	1.429.530 €	15,2 %	3	

Abbildung 5-10: Simulationsergebnisse des Experimentierplans bei Gewichtung 70/30 des Anwendungspartners (in Anlehnung an (A\_Lang 2019))

Die Szenarien 75K und 100K sind im gewählten Fall die schlechtesten Implementierungsreihenfolgen. Diese Szenarien haben einen extrapolierten Kapitalwert von 596.406 Euro und eine kumulierte Zielgrößenintegralverbesserung von 13,4 %. Die Implementierungsdauer beträgt 40,5 Quartale. Die Fokuszielgröße ist „Kosten“ bei einer

Implementierungsstrategie mit 75 % bzw. 100 % Gewichtung auf das Strategiepote-  
ntial.

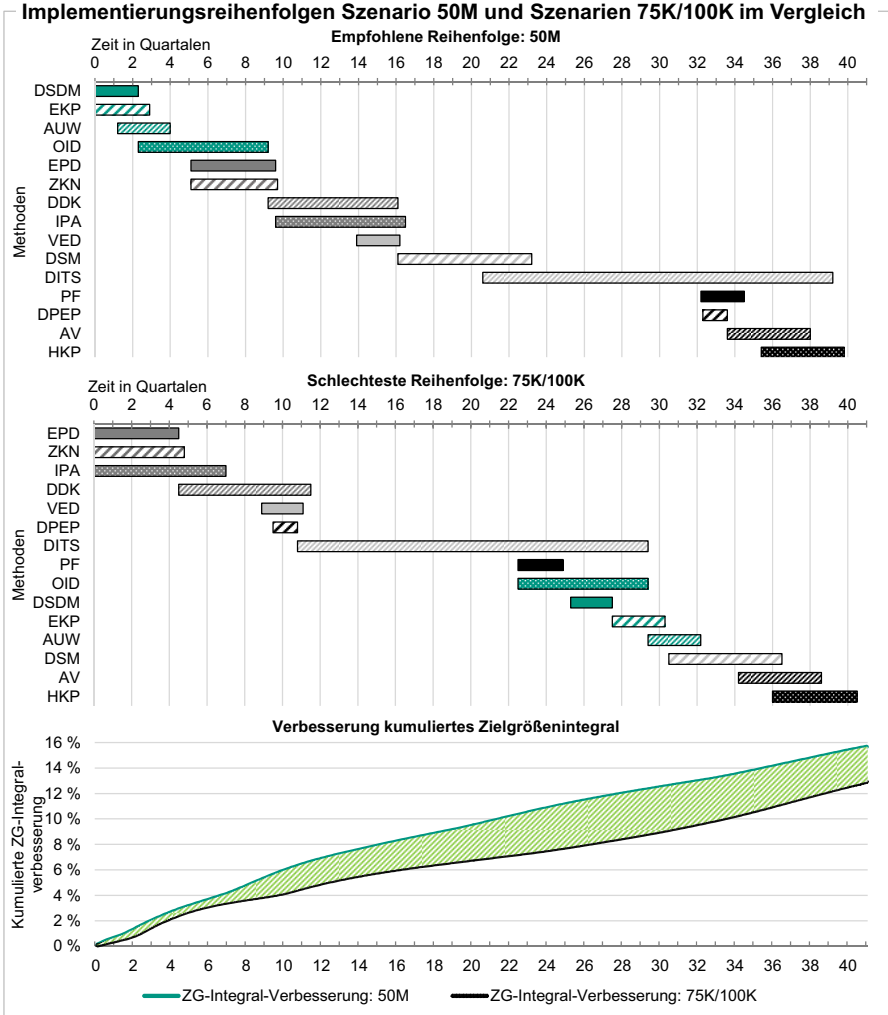


Abbildung 5-11: Implementierungsreihenfolgen ausgewählter Szenarien



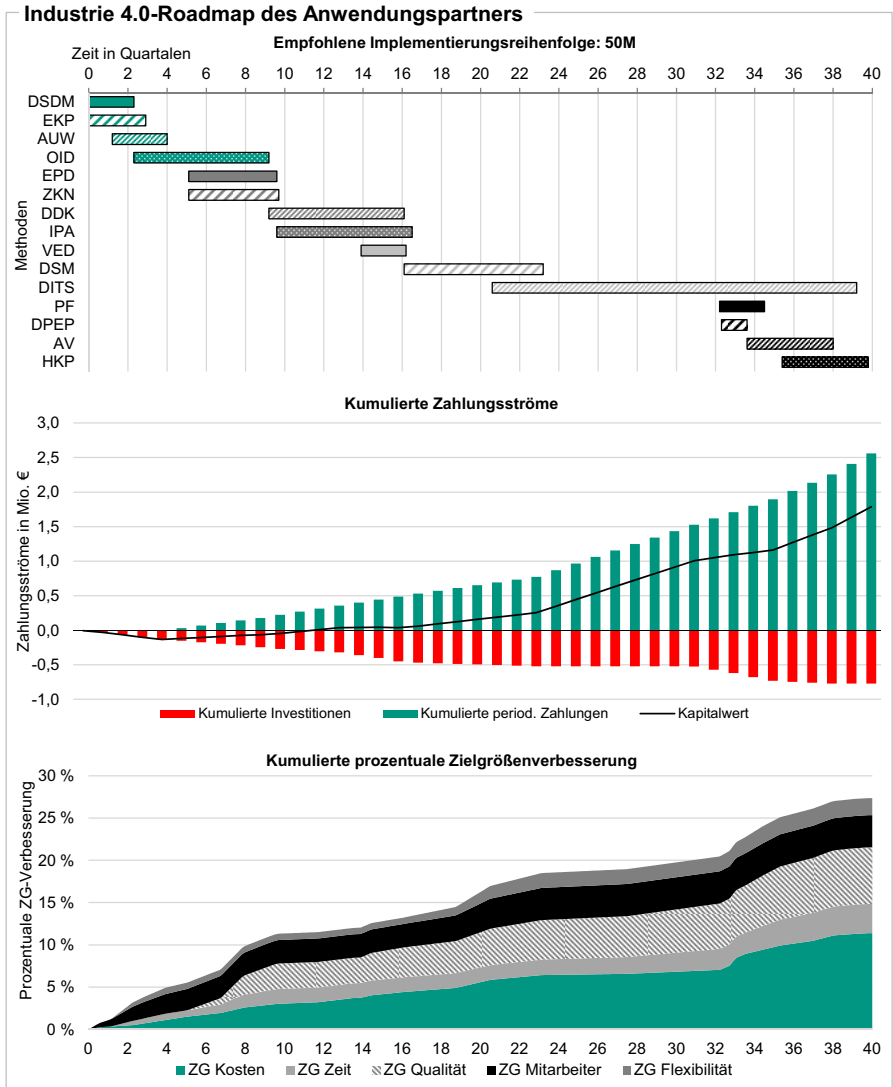


Abbildung 5-12: Industrie 4.0-Roadmap des Anwendungspartners  
(in Anlehnung an (A\_Lang 2019))

Abbildung 5-11 stellt Szenario 50M und die Szenarien 75K/100K als Gantt-Diagramm gegenüber. Die unterschiedlichen Implementierungsreihenfolgen sind deutlich zu erkennen. Bei einer vollständigen Umsetzung ist das empfohlene Szenario 50M hinsichtlich der kumulierten Zielgrößenintegralverbesserung klar besser als die Szenarien 75K/100K.

Die aus dem empfohlenen Szenario 50M resultierende Industrie 4.0-Roadmap ist in Abbildung 5-12 detailliert dargestellt. Die Reihenfolge der Implementierung aller 15 ausgewählten Industrie 4.0-Methoden wird unter Berücksichtigung ihrer Abhängigkeiten und Implementierungsdauer dargestellt. Es wird deutlich, dass die Anzahl der parallel implementierbaren Methoden ein wichtiger Begrenzungsfaktor ist. Auch die Abhängigkeiten zwischen den Methoden sind äußerst entscheidend. Die Methode „Durchgängigkeit von IT-Systemen“ (DITS) ist eindeutig eine einschränkende Methode, da die Implementierung sehr lange dauert und eine notwendige Voraussetzung für die endgültige Implementierung von weiteren Industrie 4.0-Methoden ist. An diesem Beispiel wird auch deutlich, dass die maximale Anzahl parallel implementierbarer Methoden nicht immer ausgeschöpft werden kann, wenn notwendige Voraussetzungen nicht erfüllt sind.

Der mittlere und untere Teil von Abbildung 5-12 stellt den Kapitalwert des Szenarios 50M über die Zeit sowie die kumulierten Zielgrößenverbesserungen dar. Das Szenario ist nach  $\sim 10$  Jahren implementiert, hat einen nicht extrapolierten Kapitalwert von 1.788.175 Euro und eine kumulierte konkrete Zielgrößenverbesserung von 27,36 %. Durch die umgesetzten Methoden kommen nach Abschluss der Implementierung und der linearen Zahlungsentwicklung jährliche Ausgaben von etwa 49.730 Euro auf das Unternehmen zu. Auf der anderen Seite stehen jährliche Ersparnisse von 976.049 Euro. Bereits nach 12 Quartalen zahlt sich die Implementierung von Industrie 4.0 im Fall des Anwendungspartners aus und ergibt einen positiven Kapitalwert, der eine empfehlenswerte Investition signalisiert. In Anhang I: Simulationsergebnisse Anwendungsfall sind die Ergebnisse aller Implementierungsreihenfolgen des Anwendungspartners und die Simulationsergebnisse des Szenarios 50M sowie 75K/100K detailliert aufgeführt.

Die entwickelte Methodik konnte beim Anwendungspartner erfolgreich angewandt werden. Die Methodik wurde vom Anwendungspartner ebenfalls als praxistauglich eingestuft und erfüllt die gestellten forschungsseitigen Anforderungen (siehe Kapitel 3.1).

## 5.4 Prototypische Umsetzung

Der vorgestellte Lösungsansatz ist prototypisch in Form eines modularen Softwaredemonstrators umgesetzt. Der strukturelle Aufbau und die zugehörigen Schnittstellen zum Anwender sowie zu externen Softwaretools des Softwaredemonstrators ist in Abbildung 5-13 dargestellt.

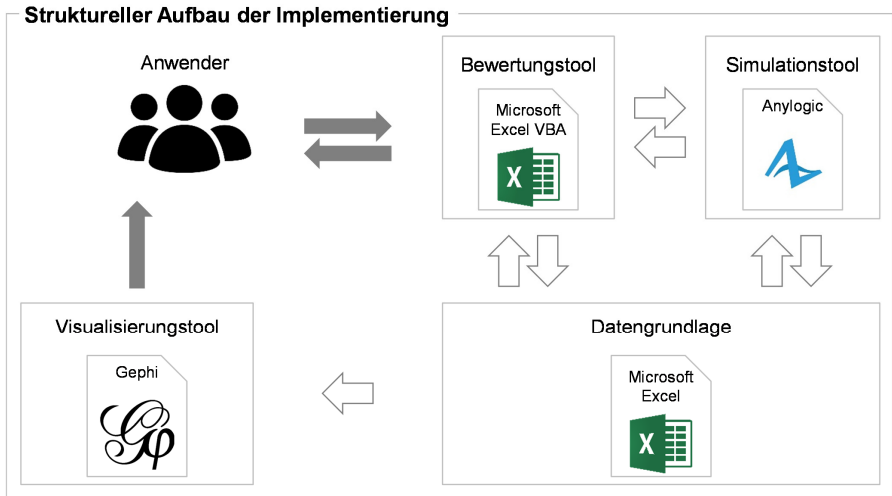


Abbildung 5-13: Prototypische Softwareumsetzung

Die in Kapitel 4.1 vorgestellte allgemeine Methodentoolbox ist in einer Microsoft Excel 2013-Datengrundlage hinterlegt. Die Darstellung der in Kapitel 4.2 abgeleiteten Potentialmethodenstränge und den dazugehörigen Informationen wird mittels Gephi (Version 0.9.2) in einem Visualisierungstool vorgenommen (siehe Abbildung 5-14).

Das Visualisierungstool ermöglicht eine strukturierte Darstellung der Methodennetze. Mit frei definierbaren Filtermöglichkeiten können spezifische Methodenstränge anwenderfreundlich dargestellt werden. Für die in Kapitel 4.3 dargelegte strategische und monetäre Bewertung, werden durch ein Bewertungstool in Excel zunächst die allgemeinen Daten aus der Excel-Datengrundlage eingelesen und vom Anwender um spezifische Werte ergänzt. Die iterative Bewertung und Priorisierung von Potentialmethodensträngen wird durch einen in VBA implementierten Algorithmus innerhalb des Bewertungstools vorgenommen.

Visualisierung des Methodenstrangs „Auftragsvisualisierung“

Methodenfilter

Kategorienauswahl (Grundansicht)

Automatisiert Varianten

Automatisiert Stückzahl

Manuell Varianten

Manuell Stückzahl

UND - Auswahl

Methodenübersicht

Auftragsvisualisierung (AV)

**Beschreibung**  
Die Auftragplanung wird in Bildschirmen in der Fertigung übersichtlich dargestellt. Auftragsdaten und Kapazitäten sind Brücksichtigig begrenzter Kapazitäten den entsprechenden Ressourcen zugeordnet. Die höhere Transparenz und der erweiterte Planungshorizont hilft u.a. Liefertermine zuverlässig einzuhalten und Rüstzeiten durch zusammenfassen ähnlicher Aufträge zu reduzieren. Mitarbeiter können durch die Visualisierung der Aufträge in Echtzeit reagieren und sich immer direkt auf die geforderten Gegebenheiten anpassen.

**Kategorie**  
Assistenzsysteme und Visualisierung

**Potentiale**  
Einhaltung von Lieferterminen Optimierung der Auftragsbearbeitung Überblick über die Auftragslage Reaktionszeit

**Risiken**  
Fehlerrisiko Planung Ständige Orientierung an Monitoren kann zur Verwirrung führen Pängigkeit zur Anpassung der Mitarbeiter

Technologischer Reifegrad 3

Aufwand

Kosten

Qualität

Flexibilität

Schließen

Methoden Visualisierung Intro 4.0 - Methodenübersicht

Anzeigeeinstellungen

Einführung (Grundansicht)

2 Vorgängerstufen

Netz (Grundansicht)

Pop-Up-Fenster - aktiviert

Legende

Voraussetzung

Unterstützung

Zielgrößen Skala

Aufwand Skala

Abbildung 5-14: Graphische Oberfläche des Visualisierungstools (in Anlehnung an (A\_Teufel 2018))

Das in Kapitel 4.4 vorgestellte Simulationsmodell wird in Anylogic (Version 8.3.3) realisiert. Das Simulationstool greift dabei auf die Excel-Datengrundlage und die Ergebnisse des Bewertungstools zu. Das Ergebnis wird zurück an das Bewertungstool übergeben. Innerhalb des Bewertungstools werden die Implementierungsreihenfolgen der Einführungsszenarien dargestellt und die empfohlene Industrie 4.0-Roadmap abgeleitet. Die detaillierte Ablaufstruktur ist in Anhang F: Ablauf Bewertungstool und Simulationsmodell dargestellt.

Es ist hervorzuheben, dass die entwickelten Tools im konzipierten Workshopkonzept (siehe Anhang G: Empfohlenes Workshopkonzept) eingesetzt werden und elementar für die erfolgreiche Anwendung der vorgestellten Methodik sind.

## 6 Diskussion und Ausblick

Der entwickelte Lösungsansatz wird in diesem Kapitel mit den in Kapitel 3.1 vorgestellten Anforderungen abgeglichen (Kapitel 6.1). Basierend darauf wird unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus der praktischen Erprobung der Methodik ein Ausblick auf weiterführende Forschungstätigkeiten gegeben (Kapitel 6.2).

### 6.1 Diskussion und kritische Würdigung

Nach der Darstellung der Ergebnisse der vorgestellten Methodik wird eine kritische Diskussion über ihre Stärken und Schwächen durchgeführt. Der entwickelte Lösungsansatz ermöglicht eine Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz durch die Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen. Die Methodik berücksichtigt dabei alle zuvor gestellten Anforderungen (siehe Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Bewertung des vorgestellten Lösungsansatzes hinsichtlich der ermittelten Anforderungen aus der industriellen Praxis

Anforderungen:	1) Strukturierung von Lean- und Industrie 4.0-Methoden (FF 1.1)	2) Verknüpfung mit einer Lean- und Industrie 4.0-Methoden-Toolbox (FF 1.2)	3) Wirkzusammenhänge Lean- und Industrie 4.0-Methoden (FF 2.1)	4) Produktionsrelevante Zielgrößen (FF 2.2)	5) Strategische Bewertungsanforderungen bzgl. Industrie 4.0 (FF 3.1)	6) Modell- und Bewertungsanforderungen für monetäre und strategische Aspekte (FF 3.2)	7) Systematisches und transparentes Auswahlverfahren	8) Implementierungsreihenfolgen (FF 4)
Eigener Ansatz	●	●	●	●	●	●	●	●

**Legende:**

- umfassend berücksichtigt
- ansatzweise berücksichtigt
- nicht berücksichtigt

Die vorgestellte Methodik präsentiert eine Sammlung der relevantesten Industrie 4.0-Methoden für die Produktion und beschreibt jede einzelne Methode ausführlich in Methodenstreckbriefen. Durch die Entwicklung einer umfangreichen **Toolbox (FF 1.2)** sind die Methoden **funktional strukturiert (FF 1.1)** und können klassifiziert werden.

Darüber hinaus werden **Wirkzusammenhänge (FF 2.1)** zwischen den Methoden berücksichtigt. Methoden können entweder in einer unterstützenden Beziehung zueinander

der stehen oder die Implementierung einer bestimmten Methode erfordert die Realisierung einer anderen Methode als notwendige Voraussetzung. Die vorgestellte Toolbox und die Berücksichtigung von Wirkzusammenhängen erweitern das Forschungsfeld um einen klaren, strukturierten und umfassenden Überblick über Industrie 4.0-Methoden und deren Abhängigkeiten. Außerdem unterstützt die Klassifizierung von Produktionstypologien jedes Unternehmen dabei, geeignete Industrie 4.0-Methoden für die eigene Produktionsumgebung zu ermitteln. Basierend auf dieser Vorauswahl kann jedes Unternehmen individuell ein Methodennetz zur Umsetzung auswählen. Des Weiteren ermöglicht es die Methodik, durch die gewählten **Zielgrößen (FF 2.2)** und Kriterien, Auswirkungen von Industrie 4.0-Methoden auf die Unternehmens- und Produktionsziele zu bewerten.

Um eine empfohlene Implementierungsreihenfolge abzuleiten, werden alle gewählten Methoden ganzheitlich bewertet. Dies wird durch die Integration von qualitativen und quantitativen Kriterien erreicht. Dabei werden **strategische und monetäre Dimensionen (FF 3.1 und FF 3.2)** kombiniert, was eine fundierte Bewertung einer geeigneten Industrie 4.0-Roadmap ermöglicht und ein **systematisches und transparentes Auswahlverfahren** darstellt. Der vorgestellte Ansatz ist anpassbar, da er jedem Anwender die Möglichkeit gibt, Methodenbeziehungen dynamisch anzupassen und bei Bedarf zu erweitern.

Darüber hinaus berücksichtigt die Methodik mehrere Detaillierungsstufen. Für jede Methode werden der allgemeine Aufwand, die Auswirkungen und das Potential durch umfangreiche Literaturrecherchen und Expertengespräche ermittelt. Diese Daten können stellvertretend verwendet werden, wenn keine spezifischen Unternehmensangaben vorliegen.

Abschließend können **Implementierungsreihenfolgen (FF 4)** abgeleitet werden, die entweder auf spezifischen oder auf allgemeinen Methodenbewertungen basieren. Die Implementierung von Industrie 4.0-Methoden ist komplex und zeitaufwändig. Um dynamische und zeitliche Einflüsse zu berücksichtigen, werden heuristisch abgeleitete Einführungsszenarien der gewählten und bewerteten Methoden in ein System Dynamics Modell eingebracht. Der dynamische Simulationsprozess unter Berücksichtigung der Methodenabhängigkeiten ermöglicht die Ableitung von Implementierungsreihenfolgen. Basierend auf unternehmensspezifischen Zielgrößen und den Modellierungsparametern kann eine Industrie 4.0-Roadmap empfohlen werden.

Die vorgestellte Methodik bietet somit einen verständlichen, anwendungsorientierten und transparenten Ansatz zur Ableitung allgemeiner und unternehmensspezifischer Implementierungsreihenfolgen. Gleichzeitig ist die Methodik flexibel gegenüber unternehmensspezifischen Anpassungen.

Durch die vorgestellten Phasen des Lösungsansatzes werden sowohl die in Kapitel 1.2 aufgeworfenen forschungsleitenden Fragestellungen (FF) beantwortet, als auch die in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen umfassend berücksichtigt und somit das identifizierte Forschungsdefizit geschlossen. Die Methodik bietet deshalb Unternehmen, die die Einführung von Industrie 4.0 anstreben, eine wertvolle Entscheidungsunterstützung. Insbesondere für KMU ist dieser Ansatz sehr vorteilhaft, da er einen einfachen, verständlichen und anpassbaren Bewertungsprozess bietet und gleichzeitig eine ganzheitliche und dynamische Methodenbewertung integriert.

Nichtsdestotrotz gibt es Einschränkungen bezüglich der Methodik, welche berücksichtigt werden müssen. Wird die Toolbox mit 60 Methoden betrachtet, sind verschiedene Implementierungsreihenfolgen möglich. Die Methodik begrenzt die Anzahl der untersuchten Szenarien, indem ein heuristischer Prozess angewendet wird, um vorteilhafte Einführungsszenarien abzuleiten. Durch diese Vereinfachung, die für eine einfache Anwendbarkeit notwendig ist, werden mögliche Implementierungsreihenfolgen vernachlässigt, die zu einer besseren Lösung hätten führen können. Darüber hinaus sind die betrachteten Modellierungsparameter nicht allumfassend und deren Beziehung zueinander begrenzt. Dies ist vor allem auf fehlende empirische Untersuchungen zu Industrie 4.0 zurückzuführen. Da sich Industrie 4.0 in einem frühen Entwicklungsstadium befindet, ist es nur schwer möglich, die gewählten Modellierungsparameter in Form von praktischen Erfahrungen vollumfänglich zu überprüfen. Obwohl alle Modellierungsparameter fundiert abgeleitet sind, musste sich die vorgestellte Methodik zur Verifizierung oft auf verwandte Forschungsgebiete stützen. Dies ist zwar in Bezug auf viele Modellierungsparameter, wie z. B. der technologische Reifegrad, unproblematisch, aber insbesondere die Verifizierung von Zeit- und Kostenschätzungen kann unzureichend sein. In der vorliegenden Arbeit basieren diese Schätzungen auf Erkenntnissen aus dem Projektmanagement. Die Methodik ist systematisch, transparent und anwenderfreundlich aufgebaut, allerdings ist die praktische Anwendung aufgrund der prototypischen Implementierung teilweise zeitaufwendig.



## 6.2 Ausblick

Die Ergebnisse des entwickelten und erprobten Lösungsansatzes können genutzt werden, um die vorgestellte Methodik zu erweitern und ihre Genauigkeit zu erhöhen. Neben den identifizierten Einschränkungen der Methodik gibt es mehrere Möglichkeiten, sie weiterzuentwickeln und modular zu erweitern.

Der entwickelte morphologische Kasten nutzt aktuell nur zwei produktionstypologische Merkmale. Hier sollte geprüft werden, ob es sinnvoll ist, weitere Merkmale aufzunehmen. Außerdem sollte die Methodenzuordnung weiter validiert werden. Außerdem ist die Aufnahme weiterer Modellierungsparameter für das Simulationsmodell denkbar. Zum Beispiel könnte ein weiterer Modellierungsparameter zur Darstellung des organisatorischen Reifegrads in das Modell integriert werden. Daher wird empfohlen, dass sich die zukünftige Forschung auf die Identifizierung relevanter organisatorischer Faktoren konzentriert, die die Einführung von Industrie 4.0 beeinflussen. Dazu gehört die Unternehmenskultur und insbesondere die Einstellung und Akzeptanz der Mitarbeiter gegenüber Veränderungen durch Industrie 4.0. Weitere Einflussfaktoren sind die Unternehmensorganisation und der aktuelle Erfahrungsstand mit neuen Technologien. Auch die eingeführten Zeit- und Kostenparameter für jede Methode, deren Bewertung auf Erkenntnissen aus dem Projektmanagement basieren, sollten Gegenstand weiterer Forschung und empirischer Analyse sein. Die Transformation von Strategiepotezial zur prozentualen Zielgrößenverbesserung ist ein anderer Aspekt, der weiter ausgearbeitet werden muss. Des Weiteren sollten in neuen Forschungsansätzen Wirkzusammenhänge nicht nur zwischen Methoden, sondern auch in Kombination zwischen den Zielgrößen und Methoden betrachtet werden. Zukünftige Forschungstätigkeiten könnten den gewählten heuristischen Ansatz insoweit verbessern, dass eine optimale Lösung gefunden werden kann. Außerdem können durch Sensitivitätsanalysen das Wirkungsverhältnis zwischen Inputgrößen und Modellergebnis unter Fixierung der nicht betrachteten Modellierungsparameter untersucht werden. Eine professionelle modulare Umsetzung der entwickelten Softwareprototypen kann die praktische Anwendung der Methodik weiter vereinfachen und den Zeitaufwand minimieren.

Insgesamt sollten zukünftige Forschungsansätze die getroffenen Annahmen überprüfen und die Methodik in weiteren Anwendungsfällen anhand ihrer Anpassungsfähigkeit und Praktikabilität bewerten.

## 7 Zusammenfassung

Die Digitalisierung aller Lebensbereiche hält verstärkt Einzug in die Produktion und bringt häufig disruptive Veränderungen mit sich. Verkürzte Produktlebenszyklen erhöhen den Kosten- und Innovationsdruck. Kunden fordern individuelle Produkte, sodass Unternehmen ihre Flexibilität steigern und eine Produktion bis hin zur Losgröße eins ermöglichen müssen. Durch diese schwer zu prognostizierende Transformation finden sich produzierende Unternehmen in einem immer dynamischeren Umfeld wieder. Die Ansätze und Technologien der Industrie 4.0 bieten Möglichkeiten, auf diese Dynamik zu reagieren, aber mit ihnen gehen gleichzeitig auch neue Herausforderungen einher.

Der betrachtete Stand der Forschung bietet eine große Anzahl an Vorgehensweisen zur Strukturierung, Analyse von Wirkzusammenhängen und Bewertung der Digitalisierung bei produzierenden Unternehmen. Die große Anzahl und Aktualität der vorgestellten Ansätze verdeutlichen den etablierten Einsatz von Vorgehensweisen bei der Digitalisierung der Produktion. Basierend auf den forschungsleitenden Fragestellungen wurden acht grundlegende Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik abgeleitet. Für jede Anforderung separat betrachtet, die an die zu entwickelnde Methodik gestellt wird, gibt es Ansätze, die die spezifische Anforderung für Lean oder Industrie 4.0 umfassend erfüllt. Insgesamt fehlt aber ein Ansatz zur Erfassung der Potentiale von Lean und Industrie 4.0, der eine kombinierte Bewertung unter Berücksichtigung der Unternehmensziele und der Implementierungsreihenfolge erlaubt und die geforderten Anforderungen umfassend über alle Bereiche abdeckt.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit eine Methodik zur Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz vorgestellt, welche die Erstellung einer unternehmensspezifisch angepassten Industrie 4.0-Roadmap zum Ziel hat. Die Methodik ist in drei Phasen gegliedert. Grundlage der Methodik ist eine allgemeine Methoden-Toolbox. In dieser sind Industrie 4.0-Methoden mittels eines Rahmenmodells grob strukturiert. Alle Industrie 4.0-Methoden werden durch einen Methodensteckbrief beschrieben und voneinander abgegrenzt.

Darauf aufbauend werden in der ersten Phase für das Unternehmen relevante Methodenstränge anhand betriebstypologischer Merkmale ausgewählt. In der zweiten Phase werden die den Strängen zugehörigen Methoden hinsichtlich strategischer Zielgrößen und des monetären Aufwands bewertet und Einführungsszenarien ausgearbeitet. Ba-

sierend auf diesen Einföhrungsszenarien werden in der dritten Phase Implementierungsreihenfolgen mittels einer System Dynamics Simulation abgeleitet und eine individuelle Industrie 4.0-Roadmap vorgeschlagen. Die Methodik wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts „Befähigungs- und Einföhrungsstrategien für Industrie 4.0 (Intro 4.0)“ entwickelt und beispielhaft mit einem Partnerunternehmen aus der Bahnindustrie validiert.

Mit der entwickelten Methodik werden die forschungsleitenden Fragestellungen und Anforderungen umfassend berücksichtigt. Nichtsdestotrotz gibt es Einschränkungen, welche in zukünftigen Forschungsansätzen aufgegriffen werden können, um die vorliegende Methodik weiterzuentwickeln.

Die erarbeitete Methodik beschreibt einen umfassenden Ansatz zur Entscheidungsunterstützung bei der Einföhrung von Industrie 4.0-Methoden in einer Produktionsumgebung durch eine fundierte Analyse des finanziellen und strategischen Potentials sowie der simulativen Analyse von Wirkzusammenhängen. Durch die Anwendung wird eine empfohlene Umsetzungsstrategie für Industrie 4.0 unter Berücksichtigung der spezifischen Unternehmensbedingungen entwickelt.

## Literaturverzeichnis

Verweise gemäß dem Schema (A\_XYZ (201x)) beziehen sich auf studentische Arbeiten des wbk, die vom Autor der Dissertation angeleitet wurden.

(A\_Adler 2019)

Adler, H. (2019), *Identifikation und Validierung von Industrie 4.0-Potentialen anhand betrieblicher Anwendungsfälle*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Antoszkiewicz 2017)

Antoszkiewicz, A. (2017), *Investitionsbewertung von cyber-physischen Produktionssystemen bei klein- und mittelständischen Unternehmen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Böhn 2018)

Böhn, N. (2018), *Ermittlung unternehmensspezifischer Einführungsreihenfolgen für Industrie 4.0-Methoden*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Eicken 2019)

Eicken, F. (2019), *Implementierung von Industrie 4.0 in mittelständischen Unternehmen am Beispiel der digitalen Produktion*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Grahm 2017)

Grahm, M. (2017), *Strategische Planung und Bewertung von cyber-physischen Produktionssystemen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Jacob 2016)

Jacob, A. (2016), *Entscheidungsunterstützung in der Industrie 4.0-Fabrikplanung: Multikriterielle Bewertung von cyber-physischen Produktionssystemen unter Unsicherheit*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Kandler 2018)

Kandler, M. (2018), *Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes zur Bildung unternehmensspezifischer Implementierungsreihenfolgen für Industrie 4.0*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Kiefer 2018)

Kiefer, L. (2018), *Simulationsgestützte Analyse von Industrie 4.0-Methoden*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Krodel 2019)

Krodel, T. (2019), *Analyse von Industrie 4.0 Methoden hinsichtlich der betriebstypologischen Eignung zur Ableitung unternehmensspezifischer Implementierungsstrategien*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Krogmann 2018)

Krogmann, M. (2018), *Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Bewertung von Industrie 4.0-Potentialen in mittelständischen Unternehmen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Kugel 2018)

Kugel, J. (2018), *Multikriterielle Bewertung der Risiken und Potentiale von cyber-physischen Produktionssystemen bei klein- und mittelständischen Unternehmen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Lang 2019)

Lang, M. M. M. (2019), *Optimierung und Weiterentwicklung eines simulationsgestützten Bewertungsmodells zur Ableitung von Implementierungsstrategien für Industrie 4.0*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Meschenmoser 2019)

Meschenmoser, J. (2019), *Entwicklung einer ganzheitlichen Methodik zur Bestimmung von Implementierungsstrategien für Industrie 4.0*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Rinnewitz 2019)

Rinnewitz, J. (2019), *Konzeptionierung eines Controlling-Systems zur Erfolgsmessung von Industrie 4.0-Einführungsstrategien*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Rosenberger 2019)

Rosenberger, P. (2019), *Simulationsgestützte Analyse von Industrie 4.0-Methoden - Ermittlung allgemeiner Implementierungsreihenfolgen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Ross 2019)

Ross, B. (2019), *Simulationsgestützte Analyse von Einführungsreihenfolgen für Industrie 4.0 Methoden – Modelloptimierung und Simulation von Use Cases*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Schaumann 2019)

Schaumann, S. (2019), *Weiterentwicklung eines Vorgehensmodells zur strukturierten Einführung von Industrie 4.0*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Schweikert 2018)

Schweikert, F. (2018), *Investitions- und Umsetzungsstrategien zur digitalen Vernetzung der Produktion mittelständischer Unternehmen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Selensky 2018)

Selensky, S. (2018), *Entwicklung von Investitions- und Umsetzungsstrategien zur digitalen Vernetzung der Produktion in mittelständischen Unternehmen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Steck 2018)

Steck, M. (2018), *Entwicklung eines Modells zur Identifikation effizienter Industrie 4.0 - Einführungsstrategien*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Stentzel 2018)

Stentzel, T. (2018), *Simulationsgestützte Analyse von Industrie 4.0 Methoden - Modellevaluation und Optimierung*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Strauss 2019)

Strauss, W. (2019), *Simulationsgestützte und iterative Bewertung der Risiken und*

*Potentiale von cyber-physischen Produktionssystemen in mittelständischen Unternehmen.* Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Teufel 2018)

Teufel, M. (2018), *Befähigungs- und Einführungsstrategien für Industrie 4.0: Entwicklung eines Visualisierungstools für Industrie 4.0 Methodennetze.* Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Tsiknas 2018)

Tsiknas, E. (2018), *Entwicklung und Software Implementierung einer Methodik zur Potential- und Risikobewertung von Industrie 4.0-Investitionen mittelständischer Unternehmen.* Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Willhelm 2019)

Willhelm, S. (2019), *Entwicklung und Implementierung eines Vorgehensmodells zur strategischen und monetären Bewertung von Industrie 4.0-Investitionen in KMU.* Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(A\_Zeranski 2017)

Zeranski, D. (2017), *Befähigungs- und Einführungsstrategien für Industrie 4.0: Wechselwirkungen von Industrie 4.0-Methoden in Produktionsunternehmen.* Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

(Abdel-Kader & Dugdale 2001)

Abdel-Kader, M. G. & Dugdale, D. (2001), „Evaluating investments in advanced manufacturing technology. A fuzzy set theory approach“, *The British Accounting Review*, 33(4), S. 455–489.

(Abdulmalek & Rajgopal 2007)

Abdulmalek, F. A. & Rajgopal, J. (2007), „Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study“, *International Journal of Production Economics*, 107(1), S. 223–236.

(Al-Aomar 2011)

Al-Aomar, R. (2011), „Handling multi-lean measures with simulation and simulated annealing“, *Journal of the Franklin Institute*, 348, S. 1506–1522.

(Aleff 1999)

Aleff, H.-J. (1999), „Produkttypologien im Marketing“, *der markt*, 38(3-4), S. 133–138.

(Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg 2019)

Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg (2019), *100 Orte für Industrie 4.0 in Baden-Württemberg*. <https://www.i40-bw.de/de/100-orte-fuer-industrie-4-0-in-baden-wuerttemberg> [21.04.2019].

(Anderl & Picard et al. 2015)

Anderl, R.; Picard, A.; Wang, Y.; Fleischer, J.; Dosch, S.; Klee, B. & Bauer, J. (2015), *Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*, VDMA Verlag GmbH, Frankfurt am Main. ISBN: 978-3-8163-0677-1.

(Apt & Bovenschulte et al. 2018)

Apt, W.; Bovenschulte, M.; Priesack, K.; Weiß, C. & Hartmann, E. A. (2018), *Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb. Im Auftrag des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales*, Berlin. [https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/Forschungsberichte/fb502-einsatz-von-digitalen-assistenzsystemen-im-betrieb.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/Forschungsberichte/fb502-einsatz-von-digitalen-assistenzsystemen-im-betrieb.pdf?__blob=publicationFile&v=1) [16.05.2019].

(Aull 2012)

Aull, F. (2012), *Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2012, Herbert Utz Verlag GmbH, München. ISBN: 978-3-8316-4283-0.

(Bauer & Schlund et al. 2014)

Bauer, W.; Schlund, S.; Marrenbach, D. & Ganschar, O. (2014), *Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Studie*, Berlin. <https://www.produktionsarbeit.de/content/dam/produktionsarbeit/de/documents/Studie-Industrie-4-0-Volkswirtschaftliches-Potential-fuer-Deutschland.pdf> [16.05.2019].

(Bauernhansl 2016)

Bauernhansl, T. (2016), „Strategien zur Einführung von Industrie 4.0“. *Einfluss von*



*Industrie 4.0 auf unsere Fabriken und die Fabrikplanung. Eine Broschüre des Fachbeirats Deutscher Fachkongress Fabrikplanung, 20. und 21. April 2016, Ludwigsburg*, Hrsg. T. Bauernhansl & U. Dombrowski, TU Braunschweig, Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung, Braunschweig, S. 39–41. ISBN: 978-3-946916-00-0.

(Becker 2016)

Becker, H. P. (2016), *Investition und Finanzierung. Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-11069-7.

(Becker 2018)

Becker, T. (2018), *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*, Springer-Verlag GmbH Deutschland, Berlin. ISBN: 978-3-662-49074-7.

(Berg 2017)

Berg, A. (2017), *Digitalisierung der Wirtschaft*, Berlin. [https://www.bitkom-research.de/WebRoot/Store19/Shops/63742557/5A1E/DF44/C00C/CC5C/CD0C/OA0C/6D0A/D4AE/Bitkom\\_Charts\\_Digitalisierung\\_der\\_Wirtschaft\\_28\\_11\\_2017\\_final.pdf](https://www.bitkom-research.de/WebRoot/Store19/Shops/63742557/5A1E/DF44/C00C/CC5C/CD0C/OA0C/6D0A/D4AE/Bitkom_Charts_Digitalisierung_der_Wirtschaft_28_11_2017_final.pdf) [16.05.2019].

(Berg 2018)

Berg, A. (2018), *Industrie 4.0 - Wo steht Deutschland?*, Hannover. <https://www.bitkom.org/sites/default/files/pdf/Presse/Anhaenge-an-Pls/2018/Bitkom-Pressekonferenz-Industrie-40-23-04-2018-Praesentation-2.pdf> [16.05.2019].

(Bergmann & Crespo 2009)

Bergmann, L. & Crespo, I. (2009), „Merkmale und Eigenschaften kleiner und mittlerer Unternehmen“ in *Modernisierung kleiner und mittlerer Unternehmen. Ein ganzheitliches Konzept*, Hrsg. U. Dombrowski, C. Herrmann, T. Lacker & S. Sonntag, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 7–12.

(Beuche 1981)

Beuche, E. (1981), *Alternative Teilungstiefen bei manueller Montage*. Zugl.: Berlin, Univ., Diss., 1981, Lokay-Druck, Berlin.

(Bichler & Krohn et al. 2017)

Bichler, K.; Krohn, R.; Philippi, P.; Denzinger, Ingo; Göhler, T.; Metzner, G.; Schloske, A.; Votteler, H.; Wipfler, O.; Schneiderei, F. & Dumrose, P. (Hrsg.)

(2017), *Kompakt-Lexikon Logistik. 2.250 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-12534-9.

(Bildstein & Seidelmann 2014)

Bildstein, A. & Seidelmann, J. (2014), „Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung“ in *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung - Technologien - Migration*, Hrsg. T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser, Springer Fachmedien, Wiesbaden, S. 581–597.

(Bischoff & Taphorn et al. 2015)

Bischoff, J.; Taphorn, C.; Wolter, D.; Braun, N.; Fellbaum, M.; Goloverov, A.; Ludwig, S.; Hegmanns, T.; Prasse, C.; Henke, M.; ten Hompel, M.; Döbbeler, F.; Fuss, E.; Kirsch, C.; Mättig, B.; Braun, S.; Guth, M.; Kaspers, M. & Scheffler, D. (2015), *Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Mülheim an der Ruhr. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erschliessen-der-potenziale-der-anwendung-von-industrie-4-0-im-mittelstand.html> [03.06.2019].

(Bittencourt & Saldanha et al. 2019)

Bittencourt, V.; Saldanha, F.; Alves, A. C. & Leão, C. P. (2019), „Contributions of Lean Thinking Principles to Foster Industry 4.0 and Sustainable Development Goals“ in *Lean Engineering for Global Development*, Hrsg. A. C. Alves, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt & A. B. Siriban-Manalang, Springer Nature Switzerland AG, [S.I.], S. 129–159.

(Bloching & Leutiger et al. 2015)

Bloching, B.; Leutiger, P.; Oltmanns, T.; Rossbach, C.; Schlick, T.; Remane, G.; Quick, P. & Shafranyuk, O. (2015), *Die digitale Transformation der Industrie. Was sie bedeutet. Wer gewinnt. Was jetzt zu tun ist*. Eine europäische Studie von Roland Berger Strategy Consultants im Auftrag des BDI. [https://bdi.eu/media/user\\_upload/Digitale\\_Transformation.pdf](https://bdi.eu/media/user_upload/Digitale_Transformation.pdf) [03.07.2019].

(BMWi 2015)

BMWi (2015), *Industrie 4.0 und Digitale Wirtschaft. Impulse für Wachstum, Beschäftigung und Innovation*. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads//\\_industrie-4-0-und-digitale-wirtschaft.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads//_industrie-4-0-und-digitale-wirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=3) [03.07.2019].

(BMWi 2019)

BMWi (2019), *Nationale Industriestrategie 2030. Strategische Leitlinien für eine*

*deutsche und europäische Industriepolitik*, Berlin. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/nationale-industriestrategie2030.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=24](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/nationale-industriestrategie2030.pdf?__blob=publicationFile&v=24) [03.06.2019].

(Borshchev & Filippov 2004)

Borshchev, A. & Filippov, A. (2004), „From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling. Reasons, Techniques, Tools“. *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society. July 25-29, 2004, Oxford, England, UK*, Hrsg. M. Kennedy, G. W. Winch, R. S. Langer, J. I. Rowe & J. M. Yanni, S. 381–404.

(Bowen & Goel et al. 2017)

Bowen, P.; Goel, A.; Schallehn, M. & Schertler, M. (2017), *Choosing the Right Platform for the Industrial IoT*. [https://www.bain.com/contentassets/c4b8bbd38c5948afbc829d2f1f67d625/bain\\_brief\\_choosing\\_the\\_right\\_platform\\_for\\_the\\_industrial\\_iiot.pdf](https://www.bain.com/contentassets/c4b8bbd38c5948afbc829d2f1f67d625/bain_brief_choosing_the_right_platform_for_the_industrial_iiot.pdf) [16.05.2019].

(Brauweiler 2019)

Brauweiler, H.-C. (2019), *Risikomanagement in Unternehmen. Ein grundlegender Überblick für die Management-Praxis*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-23479-9.

(Brieke 2009)

Brieke, M. (2009), *Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Fabrikplanung*. Zugl.: Hannover, G. W. Leibniz Univ., Diss., 2009, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Garbsen. ISBN: 978-3-941416-22-2.

(Buckley 1985)

Buckley, J. J. (1985), „Fuzzy hierarchical analysis“, *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), S. 233–247.

(Buer & Strandhagen et al. 2018)

Buer, S.-V.; Strandhagen, J. O. & Chan, F. T. S. (2018), „The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda“, *International Journal of Production Research*, 56(8), S. 2924–2940.

(Bungartz & Zimmer et al. 2013)

Bungartz, H.-J.; Zimmer, S.; Buchholz, M. & Pflüger, D. (2013), *Modellbildung und*

*Simulation. Eine anwendungsorientierte Einführung*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-37655-9.

(Cochran & Arinez et al. 2001)

Cochran, D. S.; Arinez, J. F.; Duda, J. W. & Linck, J. (2001), „A Decomposition Approach for Manufacturing System Design“, *Journal of Manufacturing Systems*, 20(6), S. 371–389.

(Cottin & Döhler 2013)

Cottin, C. & Döhler, S. (2013), *Risikoanalyse. Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-00829-1.

(Coyle 1996)

Coyle, R. G. (1996), *System Dynamics Modelling. A Practical Approach*, Chapman & Hall, London. ISBN: 978-0-412-61710-2.

(Davis 2008)

Davis, R. (2008), „Teaching Note - Teaching Project Simulation in Excel Using PERT-Beta Distributions“, *INFORMS Transactions on Education*, 8(3), S. 139–148.

(Deloitte 2019)

Deloitte (2019), *Industrie 4.0 im Mittelstand. Auf der Agenda der Top-Entscheider angekommen*. Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, München. <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/mittelstand/contents/studie-industrie-4-0-mittelstand.html> [25.08.2019].

(DIN 55350-11 2008)

DIN 55350-11 (2008), *Begriffe zum Qualitätsmanagement – Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005*. ICS 01.040.03; 03.120.01, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(Dombrowski & Ebentreich et al. 2016)

Dombrowski, U.; Ebentreich, D. & Krenkel, P. (2016), „Impact analyses of lean production systems“, *Procedia CIRP*, 57, S. 607–612.

(Dombrowski & Herrmann et al. 2009)

Dombrowski, U.; Herrmann, C.; Lacker, T. & Sonnentag, S. (Hrsg.) (2009), *Moderisierung kleiner und mittlerer Unternehmen. Ein ganzheitliches Konzept*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-540-92926-0.

(Dombrowski & Krenkel et al. 2018)

Dombrowski, U.; Krenkel, P.; Falkner, A.; Placzek, F. & Hoffmann, T. (2018), „Prozessorientierte Potenzialanalyse von Industrie 4.0-Technologien. Zielorientiertes Auswahlverfahren“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(3), S. 107–111.

(Dombrowski & Richter et al. 2015)

Dombrowski, U.; Richter, T. & Ebentreich, D. (2015), „Auf dem Weg in die vierte industrielle Revolution. Ganzheitliche Produktionssysteme zur Gestaltung der Industrie-4.0-Architektur“, *zfo Zeitschrift Führung + Organisation*, 84(3), S. 157–163.

(Dombrowski & Richter 2016)

Dombrowski, U. & Richter, T. (2016), „Ganzheitliche Produktionssysteme und Industrie 4.0. Prozessorientierung als Befähiger der Industrie 4.0“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(12), S. 771–774.

(Dombrowski & Richter et al. 2017)

Dombrowski, U.; Richter, T. & Krenkel, P. (2017), „Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems. A use cases analysis“, *Procedia Manufacturing*, 11, S. 1061–1068.

(Dombrowski & Richter 2018)

Dombrowski, U. & Richter, T. (2018), „The Lean Production System 4.0 Framework – Enhancing Lean Methods by Industrie 4.0“. *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0*. IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2018, Seoul, Korea, August 26-30, 2018, Proceedings, Part II, Hrsg. I. Moon, G. M. Lee, J. Park, D. Kiritsis & G. von Cieminski, Springer International Publishing, Cham, S. 410–416. ISBN: 978-3-319-99706-3.

(Ernst & Schmidt et al. 2016)

Ernst, H.; Schmidt, J. & Beneken, G. (2016), *Grundkurs Informatik. Grundlagen und Konzepte für die erfolgreiche IT-Praxis - Eine umfassende, praxisorientierte Einführung*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-14633-7.

(Fiebig 2004)

Fiebig, C. (2004), *Synchronisation von Fabrik- und Technologieplanung*. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2004, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. ISBN: 978-3-18-316516-2.

(Fischer 2016)

Fischer, K. (2016), „Industrie 4.0 - Kernpunkte und Themenfelder“ in *Industrie 4.0 in Eckpunkten. Ein interdisziplinärer Querschnitt*, Hrsg. U. Herfurth, Caston Edition, Hannover, S. 21–28.

(Forrester 1968)

Forrester, J. W. (1968), „Industrial Dynamics - After the First Decade“, *Management Science*, 14(7), S. 398–415.

(Ganschar & Gerlach et al. 2013)

Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T. & Schlund, S. (2013), *Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0*. Studie, Fraunhofer Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-0570-7.

(Gebhardt & Grimm et al. 2015)

Gebhardt, J.; Grimm, A. & Neugebauer, L. M. (2015), „Entwicklungen 4.0 – Ausblicke auf zukünftige Anforderungen an und Auswirkungen auf Arbeit und Ausbildung“, *Journal of Technical Education (JOTED)*, 3(2), S. 45–61.

(Geßner 2015)

Geßner, T. (2015), „Intelligente Systeme für Industrie 4.0/Smart Factory“, *Inno - Innovative Technik - Neue Anwendungen*, 20(60), S. 1–2.

(Gladen 2014)

Gladen, W. (2014), *Performance Measurement. Controlling mit Kennzahlen*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05137-2.

(Gleißner 2008)

Gleißner, W. (2008), *Grundlagen des Risikomanagements im Unternehmen*, Verlag Franz Vahlen, München. ISBN: 978-3-8006-3458-3.

(Gottmann 2016)

Gottmann, J. (2016), *Produktionscontrolling. Wertströme und Kosten optimieren*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-01950-1.

(Götze 2014)

Götze, U. (2014), *Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-54621-1.

(Greitemann 2016)

Greitemann, J. (2016), *Methodik für die systematische Identifikation von Produktionstechnologien*. Zugl.: Münschen, Univ., Diss., 2016, München.

(Grigoryev 2016)

Grigoryev, I. V. (2016), *AnyLogic 7 in three days. A quick course in simulation modeling*, CreateSpace Independent Publishing Platform, ISBN: 978-1508933748.

(Gutenschwager & Rabe et al. 2017)

Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S. & Wenzel, S. (2017), *Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen*, Springer-Verlag GmbH Deutschland, Berlin. ISBN: 978-3-662-55744-0.

(Hanschke 2018)

Hanschke, I. (2018), *Digitalisierung und Industrie 4.0 - einfach und effektiv. Systematisch und lean die Digitale Transformation meistern*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 978-3-446-45293-0.

(Heger 2007)

Heger, C. L. (2007), *Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten*. Zugl.: Hannover, G. W. Leibniz Univ., Diss., 2006, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Garbsen. ISBN: 978-3-939026-43-3.

(Hoellthaler & Braunreuther et al. 2019)

Hoellthaler, G.; Braunreuther, S. & Reinhart, G. (2019), „Requirements for a methodology for the assessment and selection of technologies of digitalization for lean production systems“. 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 18-20 July 2018, Gulf of Naples, Italy, *Procedia CIRP*, 79, S. 198–203.

(Hoellthaler & Weissenborn et al. 2019)

Hoellthaler, G.; Weissenborn, S.; Braunreuther, S. & Reinhart, G. (2019), „Method for the Identification of Potentials in Lean Production Systems as Basis for the Selection of Digitalization Technologies“. *International Conference on Competitive Manufacturing (COMA 19)*, 30 January-1 February 2019, Stellenbosch, South Africa. *Proceedings*, Hrsg. D. Dimitrov, D. Hagedorn-Hansen & K. von Leipzig, Department of Industrial Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, S. 509–514. ISBN: 978-0-7972-1779-9.

(Hwang & Yoon 1981)

Hwang, C.-L. & Yoon, K. (1981), *Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications*. A State-of-the-Art Survey, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. ISBN: 978-3-540-10558-9.

(IfM Bonn 2014)

IfM Bonn (2014), *Das Zukunftspanel Mittelstand. Eine Expertenbefragung zu den Herausforderungen des Mittelstands*, Bonn. [https://www.ifm-bonn.org/uploads/tx\\_ifmstudies/IfM-Materialien-229.pdf](https://www.ifm-bonn.org/uploads/tx_ifmstudies/IfM-Materialien-229.pdf) [03.06.2019].

(IfM Bonn 2016)

IfM Bonn (2016), *KMU-Definition des IfM Bonn*, Bonn. <https://www.ifm-bonn.org/definitionen/kmu-definition-des-ifm-bonn/> [23.10.2019].

(Irrenhauser 2014)

Irrenhauser, T. (2014), *Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2014, Herbert Utz Verlag GmbH, München. ISBN: 978-3-8316-4404-9.

(Jodlbauer & Schagerl 2016)

Jodlbauer, H. & Schagerl, M. (2016), „Reifegradmodell Industrie 4.0 - Ein Vorgehensmodell zur Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen“. *INFORMATIK 2016. Lecture Notes in Informatics*. 26.-30. September 2016, Klagenfurt, Hrsg. H. C. Mayr & M. Pinzger, Gesellschaft für Informatik e.V., Bonn, S. 1473–1487. ISBN: 978-3-88579-653-4.

(Jondral 2013)

Jondral, A. G. (2013), *Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes*. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2013, Shaker Verlag GmbH, Aachen. ISBN: 978-3-8440-1804-2.

(Joppen & Lipsmeier et al. 2019)

Joppen, R.; Lipsmeier, A.; Tewes, C.; Kühn, A. & Dumitrescu, R. (2019), „Evaluation of investments in the digitalization of a production“. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems, 12-14 June 2019, Ljubljana, Slovenia, *Procedia CIRP*, 81, S. 411–416.



(Kamarianakis 2013)

Kamarianakis, S. (2013), *Ein multikriterielles fuzzy- und risikobasiertes Entscheidungsmodell für die Planung unterirdischer Infrastruktur*. Zugl.: Bochum, Ruhr- Univ., Diss., 2013, Shaker Verlag GmbH, Aachen. ISBN: 978-3-8440-2429-6.

(Kellner & Lienland et al. 2018)

Kellner, F.; Lienland, B. & Lukesch, M. (2018), *Produktionswirtschaft. Planung, Steuerung und Industrie 4.0*, Springer-Verlag GmbH Deutschland, Berlin. ISBN: 978-3-662-54340-5.

(Kern 1974)

Kern, W. (1974), *Investitionsrechnung*, C. E. Poeschel Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-7910-0161-6.

(Kletti & Schumacher 2014)

Kletti, J. & Schumacher, J. (2014), *Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-45440-4.

(Kolakowski & Schady et al. 2007)

Kolakowski, M.; Schady, R. & Sauer, K. (2007), „Grundlagen für die "Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung (EWR)". Ganzheitliche Systematik zur Integration qualitativer Kriterien in der Fabrikplanung“, *wt Werkstattstechnik online*, 97(4), S. 226–231.

(Krebs 2012)

Krebs, P. (2012), *Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2011, Herbert Utz Verlag GmbH, München. ISBN: 978-3-8316-4156-7.

(Kühnapfel 2017)

Kühnapfel, J. B. (2017), *Vertriebscontrolling. Methoden im praktischen Einsatz*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-13896-7.

(Langlotz & Aurich 2019)

Langlotz, P. & Aurich, J. C. (2019), „Systematical Combination of a Lean Production System and Industry 4.0. Development of a method library to assess interactions“ in *Production at the leading edge of technology - Proceedings of the 9th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), September*

30th - October 2nd, Hamburg 2019, Hrsg. J. P. Wulfsberg, W. Hintze & B.-A. Behrens, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 573–582.

(Lanza & Nyhuis 2018)

Lanza, G. & Nyhuis, P. (Hrsg.) (2018), *Industrie 4.0 für die Praxis. Befähigungs- und Einführungsstrategien*, TEWISS-Technik und Wissen GmbH, Garbsen. ISBN: 978-3-95900-224-0.

(Lanza & Nyhuis et al. 2018)

Lanza, G.; Nyhuis, P.; Fisel, J.; Jacob, A.; Nielsen, L.; Schmidt, M. & Stricker, N. (2018), *Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0 (acatech Studie)*, München. [https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/04/PI40\\_lang\\_Forschungsbeitrag\\_Wandlungsa%CC%88higkeit\\_lang\\_bf\\_fin.pdf](https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/04/PI40_lang_Forschungsbeitrag_Wandlungsa%CC%88higkeit_lang_bf_fin.pdf) [15.08.2019].

(Leineweber & Wienbruch et al. 2018)

Leineweber, S.; Wienbruch, T.; Lins, D.; Kreimeier, D. & Kuhlenkötter, B. (2018), „Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model“. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 16-18 May 2018, Stockholm, Sweden, *Procedia CIRP*, 72, S. 404–409.

(Lichtblau & Stich et al. 2015)

Lichtblau, K.; Stich, V.; Bertenrath, R.; Blum, M.; Bleider, M.; Millack, A.; Schmitt, K.; Schmitz, E. & Schröter, M. (2015), *Industrie 4.0-Readiness. IMPULS Studie*, Aachen, Köln. <http://www.impuls-stiftung.de/documents/3581372/4875835/Industrie+4.0+Readiness+IMPULS+Studie+Oktober+2015.pdf/447a6187-9759-4f25-b186-b0f5eac69974> [16.05.2019].

(Liebrecht & Böhn et al. 2018)

Liebrecht, C.; Böhn, N.; Kiefer, L.; Teufel, M. & Lanza, G. (2018), „Einführung von Industrie 4.0. Ermittlung unternehmensspezifischer Einführungsreihenfolgen für Industrie 4.0-Methoden“, *Industrie 4.0 Management*, 34(6), S. 21–24.

(Liebrecht & Hübner 2018a)

Liebrecht, C. & Hübner, M. (2018), „Industrie 4.0-Methoden-Toolbox“ in *Industrie 4.0 für die Praxis. Befähigungs- und Einführungsstrategien*, Hrsg. G. Lanza & P. Nyhuis, TEWISS-Technik und Wissen GmbH, Garbsen, S. 197–203.

(Liebrecht & Jacob et al. 2017)

Liebrecht, C.; Jacob, A.; Kuhnle, A. & Lanza, G. (2017), „Multi-Criteria Evaluation of Manufacturing Systems 4.0 under Uncertainty“. The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 3-5 May 2017, Taichung, Taiwan, *Procedia CIRP*, 63, S. 224–229.

(Liebrecht & Krodel et al. 2019)

Liebrecht, C.; Krodel, T.; Stricker, N. & Lanza, G. (2019), „Ausprägungen von Industrie 4.0 im Mittelstand. Zusammenhänge zwischen der Morphologie von Produktionsbereichen und der Einsetzbarkeit von Industrie 4.0-Methoden“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 114(6), S. 398–403.

(Liebrecht & Krogmann et al. 2019)

Liebrecht, C.; Krogmann, M.; Stricker, N. & Lanza, G. (2019), „Methoden-Toolbox zur Einführung von Industrie 4.0. Identifikation und Bewertung von Industrie 4.0-Potenzialen in mittelständischen Unternehmen“, *wt Werkstattstechnik online*, 109(4), S. 214–220.

(Liebrecht & Schaumann et al. 2018)

Liebrecht, C.; Schaumann, S.; Zeranski, D.; Antoszkiewicz, A. & Lanza, G. (2018), „Analysis of Interactions and Support of Decision Making for the Implementation of Manufacturing Systems 4.0 Methods“. 10th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems, IPS<sup>2</sup> 2018, 29-31 May 2018, Linköping, Sweden, *Procedia CIRP*, 73, S. 161–166.

(Lösch 2013)

Lösch, F. (2013), *Wertorientierte Investitionsplanung für Betriebsmittel*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2013, Apprimus-Verlag, Aachen. ISBN: 978-3-86359-143-4.

(Mankins 2009)

Mankins, J. C. (2009), „Technology readiness assessments: A retrospective“, *Acta Astronautica*, 65(9-10), S. 1216–1223.

(Matt & Unterhofer et al. 2018)

Matt, D. T.; Unterhofer, M.; Rauch, E.; Riedl, M. & Brozzi, R. (2018), „Industrie 4.0 Assessment - Bewertungsmodell zur Identifikation und Priorisierung von Industrie

4.0 Umsetzungsmaßnahmen in KMUs“ in *KMU 4.0 - Digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen*, Hrsg. D. T. Matt, GITO Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation, Berlin, S. 93–112.

(Mayr & Weigelt et al. 2018)

Mayr, A.; Weigelt, M.; Kühl, A.; Grimm, S.; Ertl, A.; Potzel, M. & Franke, J. (2018), „Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0“. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 16-18 May 2018, Stockholm, Sweden, *Procedia CIRP*, 72, S. 622–628.

(McKinsey & Company 2016)

McKinsey & Company (2016), *Industry 4.0 after the initial hype. Where manufacturers are finding value and how they can best capture it*. [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/getting%20the%20most%20out%20of%20industry%204%200/mckinsey\\_industry\\_40\\_2016.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/getting%20the%20most%20out%20of%20industry%204%200/mckinsey_industry_40_2016.ashx) [16.05.2019].

(Merl 2016)

Merl, T. (2016), *Konfiguration Ganzheitlicher Produktionssysteme in kleinen und mittleren Unternehmen. Entwicklung eines innovativen Modells anhand einer Fallstudie in der Lohn- und Auftragsfertigung*. Zugl.: Lüneburg, Univ., Diss., 2015, Universitätsbibliothek, Lüneburg.

(Merz 2016)

Merz, S. L. (2016), „Industrie 4.0-Strategie: So geht man bei der Einführung vor“ in *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*, Hrsg. A. Roth, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 85–109.

(Metternich & Müller et al. 2017)

Metternich, J.; Müller, M.; Meudt, T. & Schaede, C. (2017), „Lean 4.0 – zwischen Widerspruch und Vision“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112(5), S. 346–348.

(Meyer 2011)

Meyer, C. (2011), *Betriebswirtschaftliche Kennzahlen und Kennzahlen-Systeme*, Verlag Wissenschaft & Praxis, Sternenfels. ISBN: 978-3-89673-599-7.

(Michaeli 2017)

Michaeli, P. B. (2017), *Methodik zur Entwicklung von Produktionsstrategien am Beispiel der Triebwerksindustrie*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2016, Herbert Utz Verlag GmbH, München. ISBN: 978-3-8316-4642-5.

(Mittal & Khan et al. 2019)

Mittal, S.; Khan, M. A.; Purohit, K. P.; Menon, K.; Romero, D. & Wuest, T. (2019), „A Smart Manufacturing Adoption Framework for SMEs“, *International Journal of Production Research*, S. 1–19.

(Mittal & Romero et al. 2018a)

Mittal, S.; Romero, D. & Wuest, T. (2018), „Towards a Smart Manufacturing Maturity Model for SMEs (SM<sup>3</sup>E)“. *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0*. IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2018, Seoul, Korea, August 26-30, 2018, Proceedings, Part II, Hrsg. I. Moon, G. M. Lee, J. Park, D. Kiritsis & G. von Cieminski, Springer International Publishing, Cham, S. 155–163. ISBN: 978-3-319-99706-3.

(Mittal & Romero et al. 2018b)

Mittal, S.; Romero, D. & Wuest, T. (2018), „Towards a Smart Manufacturing Toolkit for SMEs“. *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*. 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2-4, 2018, Proceedings, Hrsg. P. Chiabert, A. Bouras, F. Noël & J. Ríos, Springer International Publishing, Cham, S. 476–487. ISBN: 978-3-030-01613-5.

(Morlock & Wienbruch et al. 2016)

Morlock, F.; Wienbruch, T.; Leineweber, S.; Kreimeier, D. & Kuhlenkötter, B. (2016), „Industrie 4.0-Transformation für produzierende Unternehmen. Reifegradbasierte Migration zum Cyber-physischen Produktionssystem“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(5), S. 306–309.

(Mrugalska & Wyrwicka 2017)

Mrugalska, B. & Wyrwicka, M. K. (2017), „Towards Lean Production in Industry 4.0. 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management“, *Procedia Engineering*, 182, S. 466–473.

(Munz & Westermann 2019)

Munz, C.-D. & Westermann, T. (2019), *Numerische Behandlung gewöhnlicher und*

*partieller Differenzialgleichungen. Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch für Ingenieure*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-55885-0.

(Netland & Ferdows 2016)

Netland, T. H. & Ferdows, K. (2016), „The S-Curve Effect of Lean Implementation“, *Production and Operations Management*, 25(6), S. 1106–1120.

(Nöhring & Wöstmann et al. 2018)

Nöhring, F.; Wöstmann, R. & Deuse, J. (2018), „Auswahlhilfe für Industrie 4.0-Lösungen“ in *Industrie 4.0 für die Praxis. Mit realen Fallbeispielen aus mittelständischen Unternehmen und vielen umsetzbaren Tipps*, Hrsg. R. M. Wagner, Springer Fachmedien, Wiesbaden, S. 67–87.

(Obermaier 2017)

Obermaier, R. (2017), „Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Strategische und operative Handlungsfelder für Industriebetriebe“ in *Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen*, Hrsg. R. Obermaier, Springer Fachmedien, Wiesbaden, S. 3–34.

(Ohno 1988)

Ohno, T. (1988), *Toyota production system. Beyond large-scale production*, Productivity Press, Cambridge, Mass. ISBN: 978-0-915299-14-0.

(Pelzer 1999)

Pelzer, W. (1999), *Methodik zur Identifizierung und Nutzung strategischer Technologiepotentiale*. Zugl.: Aachen, RWTH, Diss., 1999, Shaker Verlag GmbH, Aachen. ISBN: 978-3-8265-6565-6.

(Pessl & Sorko et al. 2017)

Pessl, E.; Sorko, S. R. & Mayer, B. (2017), „Roadmap Industry 4.0 - Implementation Guideline for Enterprises“, *International Journal of Science, Technology and Society*, 5(6), S. 193–202.

(Peter 2009)

Peter, K. (2009), *Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2009, Shaker Verlag GmbH, Aachen. ISBN: 978-3-8322-8713-9.

(Peters & Zelewski 2007)

Peters, M. L. & Zelewski, S. (2007), „TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse“, *WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 36(1), S. 9–15.

(Pfeffer 2014)

Pfeffer, M. (2014), *Bewertung von Wertströmen. Kosten-Nutzen-Betrachtung von Optimierungsszenarien*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-02127-6.

(Plattform Industrie 4.0 2015)

Plattform Industrie 4.0 (2015), *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*. [https://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/Industrie\\_4.0/2015-04-10\\_Umsetzungsstrategie\\_Industrie\\_4.0\\_Plattform\\_Industrie\\_4.0.pdf](https://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/Industrie_4.0/2015-04-10_Umsetzungsstrategie_Industrie_4.0_Plattform_Industrie_4.0.pdf) [04.07.2019].

(Plattform Industrie 4.0 2019)

Plattform Industrie 4.0 (2019), *Landkarte Industrie 4.0*. <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/Karte/SiteGlobals/Forms/Formulare/karte-anwendungsbeispiele-formular.html> [21.04.2019].

(Poggensee 2015)

Poggensee, K. (2015), *Investitionsrechnung. Grundlagen - Aufgaben - Lösungen*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-03090-2.

(Pröhl & Werner et al. 2013)

Pröhl, M.; Werner, M.; Raubach, G. & Kaupp, P. (2013), „Wirtschaftlich fertigen bei sinkenden Stückzahlen. Flexible Fertigungsmethode für Struktur-Blechbauteile in mittleren Serien bis zu 50.000 Stück p.a.“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 108(5), S. 320–324.

(Reinhart & Schindler et al. 2011)

Reinhart, G.; Schindler, S. & Krebs, P. (2011), „Strategic Evaluation of Manufacturing Technologies“ in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011*, Hrsg. J. Hesselbach & C. Herrmann, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 179–184.

(Riedl 2006)

Riedl, R. (2006), „Analytischer Hierarchieprozess vs. Nutzwertanalyse: Eine vergleichende Gegenüberstellung zweier multiattributiver Auswahlverfahren am Beispiel Application Service Providing“ in *Wirtschaftsinformatik als Schlüssel zum Unternehmenserfolg*, Hrsg. K. Fink & C. Ploder, Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, S. 99–127.

(Rivera & Chen 2007)

Rivera, L. & Chen, F. F. (2007), „Measuring the impact of Lean tools on the cost-time investment of a product using cost-time profiles“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6), S. 684–689.

(Rogalski 2009)

Rogalski, S. (2009), *Entwicklung einer Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. Messung von Mengen-, Mix- und Erweiterungsflexibilität zur Bewältigung von Planungsunsicherheiten in der Produktion*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2009, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe. ISBN: 978-3-86644-383-9.

(Rossini & Costa et al. 2019)

Rossini, M.; Costa, F.; Tortorella, G. L. & Portioli-Staudacher, A. (2019), „The interrelation between Industry 4.0 and lean production: an empirical study on European manufacturers“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9-12), S. 3963–3976.

(Rößler & Haschemi 2017)

Rößler, M. P. & Haschemi, M. (2017), „Smart Factory Assessment (SFA). Eine Methodik zur integralen Reifegradbewertung von Produktion und Logistik hinsichtlich Lean und Industrie 4.0“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112(10), S. 699–703.

(Roth 2016)

Roth, A. (2016), „Industrie 4.0 - Hype oder Revolution?“ in *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*, Hrsg. A. Roth, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 1–16.

(Rudtsch 2016)

Rudtsch, V. (2016), *Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase*. Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2016, Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut, Paderborn. ISBN: 978-3-942647-74-8.



(Rüttimann & Stöckli 2016)

Rüttimann, B. G. & Stöckli, M. T. (2016), „Lean and Industry 4.0 - Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems“, *Journal of Service Science and Management*, 9(6), S. 485–500.

(Saaty 1990)

Saaty, T. L. (1990), „How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process“, *European Journal of Operational Research*, 48(1), S. 9–26.

(Schawel & Billing 2014)

Schawel, C. & Billing, F. (2014), „Morphologischer Kasten (Kreativitätstechniken)“ in *Top 100 Management Tools. Das wichtigste Buch eines Managers. Von ABC-Analyse bis Zielvereinbarung*, Hrsg. C. Schawel & F. Billing, Gabler Verlag, Wiesbaden, S. 171–173.

(Schindler 2014)

Schindler, S. (2014), *Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2014, Herbert Utz Verlag GmbH, München. ISBN: 978-3-8316-4434-6.

(Schomburg 1980)

Schomburg, E. (1980), *Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau*. Diss., Aachen.

(Schönmann & Dobler et al. 2018)

Schönmann, A.; Dobler, R.; Hofer, A. & Reinhart, G. (2018), „Planung und Bewertung von Produktionstechnologien. Gestaltungswerkzeuge für das strategische Technologiemanagement“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(1-2), S. 7–11.

(Schuh & Anderl et al. 2017)

Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; ten Hompel, M. & Wahlster, W. (Hrsg.) (2017), *Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten (acatech STUDIE)*, Herbert Utz Verlag GmbH, München. ISBN: 978-3-8316-4611-1.

(Schuh & Boos et al. 2018)

Schuh, G.; Boos, W.; Kelzenberg, C.; de Lange, J.; Stracke, F.; Helbig, J.; Boshof,

J. & Ebbecke, C. (2018), *Industrie 4.0: Implement it! Ein Leitfaden zur erfolgreichen Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen*, RWTH Aachen Werkzeugmaschinenlabor, Aachen. ISBN: 978-3-946612-32-2.

(Schuh & Stich 2012)

Schuh, G. & Stich, V. (Hrsg.) (2012), *Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-25423-9.

(Schuh & Stich 2014)

Schuh, G. & Stich, V. (Hrsg.) (2014), *Enterprise-Integration. Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-41890-7.

(Schulze & Brieke et al. 2012)

Schulze, P.; Brieke, M.; Seidel, H. & Sallaba, G. (2012), „Teil II: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Fabrikplanung“ in *Strategien und nachhaltige Wirtschaftlichkeit in der Fabrikplanung. Standorte gezielt auswählen, Investitionen sicher planen*, Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, S. 75–110.

(Sedlmeier 2014)

Sedlmeier, L. (2014), *Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Strategieimplementierung: Zwei Fallstudien zur Anwendung des Analytic Network Process im strategischen Controlling*. Zugl.: St. Gallen, Univ., Diss., 2014, Epubli GmbH, Berlin. ISBN: 978-3-7375-2169-7.

(Seefried 2017)

Seefried, J. (2017), *Kompetenzsteuerung im Controlling - Ein Vorgehensmodell auf Basis des AHP zur Entwicklung der Finance Business Partner Funktion*. Zugl.: St. Gallen, Univ., Diss., 2017, Epubli GmbH, Berlin.

(Seiter & Bayrle et al. 2016)

Seiter, M.; Bayrle, C.; Berlin, S.; David, U.; Rusch, M. & Treusch, O. (2016), *Roadmap Industrie 4.0: Ihr Weg zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0. Mit Praxisbeispielen der Unternehmen Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, ESTA Apparatebau GmbH + Co. KG, Euchner GmbH + Co. KG, Günther Wirth Hartmetallwerkzeuge Betriebs-GmbH, KSB Aktiengesellschaft und Trumpf GmbH + Co. KG*, tredition GmbH, Hamburg. ISBN: 978-3-7345-3321-1.

(Siedler & Langlotz et al. 2019)

Siedler, C.; Langlotz, P. & Aurich, J. C. (2019), „Identification of interactions between digital technologies in manufacturing systems“. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems, 12-14 June 2019, Ljubljana, Slovenia, *Procedia CIRP*, 52, S. 115–120.

(Siedler & Sadaune et al. 2019)

Siedler, C.; Sadaune, S.; Zavareh, M. T.; Eigner, M.; Zink, K. J. & Aurich, J. C. (2019), „Categorizing and selecting digitization technologies for their implementation within different product lifecycle phases“. 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 18-20 July 2018, Gulf of Naples, Italy, *Procedia CIRP*, 79, S. 274–279.

(Siepmann 2016)

Siepmann, D. (2016), „Industrie 4.0 - Fünf zentrale Paradigmen“ in *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*, Hrsg. A. Roth, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 35–46.

(Singer 1990)

Singer, U. (1990), *Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in Neue Produktionstechnologien*. Zugl.: St. Gallen, Hochschule, Diss., 1990, Difo-Druck GmbH, Bamberg.

(Statistisches Bundesamt 2019)

Statistisches Bundesamt (2019), *Bruttoinlandsprodukt 2018 für Deutschland. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 15. Januar 2019 in Berlin*, Wiesbaden. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2019/BIP2018/pressebrochure-bip.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2019/BIP2018/pressebrochure-bip.pdf?__blob=publicationFile&v=3) [03.06.2019].

(Staufen AG 2018)

Staufen AG (2018), *Deutscher Industrie 4.0 Index 2018. Eine Studie der Staufen AG und der Staufen Digital Neonex GmbH*. <https://www.staufen.ag/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAUFEN.-Studie-Industrie-4.0-Index-2018-Web-DE-de.pdf> [16.05.2019].

(Stricker 2016)

Stricker, N. (2016), *Robustheit verketteter Produktionssysteme. Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit*. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2016, Shaker Verlag GmbH, Aachen. ISBN: 978-3-8440-4801-8.

(Teich & Kolbenschlag et al. 2008)

Teich, I.; Kolbenschlag, W. & Reiners, W. (2008), *Der richtige Weg zur Softwareauswahl. Lastenheft, Pflichtenheft, Compliance, Erfolgskontrolle*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-540-71261-9.

(VDI 2870 Blatt 1 2012)

VDI 2870 Blatt 1 (2012), *Ganzheitliche Produktionssysteme. Grundlagen, Einführung und Bewertung*. ICS 03.100.50, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(VDI 2870 Blatt 2 2013)

VDI 2870 Blatt 2 (2013), *Ganzheitliche Produktionssysteme. Methodenkatalog*. ICS 03.100.50, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(VDI 3633 Blatt 1 2014)

VDI 3633 Blatt 1 (2014), *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Grundlagen*. ICS 03.100.10, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(von Bredow 2014)

von Bredow, M. J. (2014), *Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2012, Herbert Utz Verlag GmbH, München. ISBN: 978-3-8316-4337-0.

(Westkämper 2006)

Westkämper, E. (2006), *Einführung in die Organisation der Produktion*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-540-30764-8.

(Weyer & Roos 2017)

Weyer, J. & Roos, M. (2017), „Agentenbasierte Modellierung und Simulation. Instrument prospektiver Technikfolgenabschätzung“, *TATuP (Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis)*, 26(3), S. 11–16.

(Wieland & Pfitzner 2014)

Wieland, U. & Pfitzner, M. (2014), „Interdisziplinäre Datenanalyse für Industrie 4.0“, *Controlling & Management Review*, 58(7), S. 80–85.

(Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007)

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N. & Brieke, M. (2007), „Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation“, *CIRP Annals*, 56(2), S. 783–809.

(Wischmann & Wangler et al. 2015)

Wischmann, S.; Wangler, L. & Botthof, A. (2015), *Industrie 4.0. Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland. Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0*, Berlin. <https://vdivde-it.de/system/files/pdfs/industrie-4.0-volks-und-betriebswirtschaftliche-faktoren-fuer-den-standort-deutschland.pdf> [16.05.2019].

(Wöhe & Döring et al. 2016)

Wöhe, G.; Döring, U. & Brösel, G. (2016), *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, Verlag Franz Vahlen, München. ISBN: 978-3-8006-5000-2.

(Wolke 2016)

Wolke, T. (2016), *Risikomanagement*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin, Boston. ISBN: 978-3-11-039732-1.

(Zangemeister 2000)

Zangemeister, C. (2000), *Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA). Grundlagen, Leitfaden und PC-gestützte Arbeitshilfen für ein "3-Stufen-Verfahren" zur Arbeitsystembewertung*, Wirtschaftsverlag NW, Verlag für Neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven. ISBN: 978-3-89701-509-8.

(Zäpfel 1989)

Zäpfel, G. (1989), *Strategisches Produktions-Management*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin. ISBN: 978-3-486-25450-1.



## Liste eigener Veröffentlichungen

(Hübner & Liebrecht et al. 2017)

Hübner, M.; Liebrecht, C.; Malessa, N.; Kuhnle, A.; Nyhuis, P. & Lanza, G. (2017), „Vorgehensmodell zur Einführung von Industrie 4.0. Vorstellung eines Vorgehensmodells zur bedarfsgerechten Einführung von Industrie 4.0-Methoden“, *wt Werkstattstechnik online*, 107(4), S. 266–272.

(Hübner & Liebrecht et al. 2018)

Hübner, M.; Liebrecht, C.; Malessa, N. & Kuhnle, A. (2018), „Vorgehensmodell zur Einführung von Industrie 4.0“ in *Industrie 4.0 für die Praxis. Befähigungs- und Einführungsstrategien*, Hrsg. G. Lanza & P. Nyhuis, TEWISS-Technik und Wissen GmbH, Garbsen, S. 14–22.

(Lanza & Liebrecht 2019)

Lanza, G. & Liebrecht, C. (2019), „Learning Factory on Global Production. Use Case Augmented Go & See“, *The 2019 World Manufacturing Forum Report - Skills for the Future of Manufacturing*, S. 56.

(Lanza & Nyhuis et al. 2016)

Lanza, G.; Nyhuis, P.; Ansari, S. M.; Kuprat, T. & Liebrecht, C. (2016), „Befähigungs- und Einführungsstrategien für Industrie 4.0. Vorstellung eines reifegradbasierten Ansatzes zur Implementierung von Industrie 4.0“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(1-2), S. 76–79.

(Liebrecht & Berner et al. 2018)

Liebrecht, C.; Berner, F.; Stieler, F. & Lanza, G. (2018), „Maschinendatenkonzepte als Basis der digitalen Produktion. Einführung eines standardisierten Vorgehens zur Entwicklung eines Datenkonzeptes für intelligente Produktionsanlagen bei der Firma STIHL“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(5), S. 285–289.

(Liebrecht & Böhn et al. 2018)

Liebrecht, C.; Böhn, N.; Kiefer, L.; Teufel, M. & Lanza, G. (2018), „Einführung von Industrie 4.0. Ermittlung unternehmensspezifischer Einführungsreihenfolgen für Industrie 4.0-Methoden“, *Industrie 4.0 Management*, 34(6), S. 21–24.

(Liebrecht & Bürgin et al. 2016)

Liebrecht, C.; Bürgin, J.; Benterbusch, J.; Kiefer, C. & Lanza, G. (2016), „Shopfloor-getriebene Einführung von Industrie 4.0. Ein Bottom-up-Ansatz zur Reifegradbewertung für Industrie 4.0-Anwendungen“, *wt Werkstattstechnik online*, 106(7/8), S. 539–543.

(Liebrecht & Hochdörffer et al. 2017)

Liebrecht, C.; Hochdörffer, J.; Treber, S.; Moser, E.; Erbacher, T.; Gidion, G. & Lanza, G. (2017), „Concept development for the verification of the didactic competence promotion for the Learning Factory on Global Production“. 7th Conference on Learning Factories, CLF 2017, Darmstadt, Germany, *Procedia Manufacturing*, 9, S. 315–322.

(Liebrecht & Hübner 2018a)

Liebrecht, C. & Hübner, M. (2018), „Industrie 4.0-Methoden-Toolbox“ in *Industrie 4.0 für die Praxis. Befähigungs- und Einführungsstrategien*, Hrsg. G. Lanza & P. Nyhuis, TEWISS-Technik und Wissen GmbH, Garbsen, S. 197–203.

(Liebrecht & Hübner 2018b)

Liebrecht, C. & Hübner, M. (2018), „Quick-Check Industrie 4.0“ in *Industrie 4.0 für die Praxis. Befähigungs- und Einführungsstrategien*, Hrsg. G. Lanza & P. Nyhuis, TEWISS-Technik und Wissen GmbH, Garbsen, S. 180–184.

(Liebrecht & Jacob et al. 2017)

Liebrecht, C.; Jacob, A.; Kuhnle, A. & Lanza, G. (2017), „Multi-Criteria Evaluation of Manufacturing Systems 4.0 under Uncertainty“. The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 3-5 May 2017, Taichung, Taiwan, *Procedia CIRP*, 63, S. 224–229.

(Liebrecht & Krodel et al. 2019)

Liebrecht, C.; Krodel, T.; Stricker, N. & Lanza, G. (2019), „Ausprägungen von Industrie 4.0 im Mittelstand. Zusammenhänge zwischen der Morphologie von Produktionsbereichen und der Einsetzbarkeit von Industrie 4.0-Methoden“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 114(6), S. 398–403.



(Liebrecht & Krogmann et al. 2019)

Liebrecht, C.; Krogmann, M.; Stricker, N. & Lanza, G. (2019), „Methoden-Toolbox zur Einführung von Industrie 4.0. Identifikation und Bewertung von Industrie 4.0-Potenzialen in mittelständischen Unternehmen“, *wt Werkstattstechnik online*, 109(4), S. 214–220.

(Liebrecht & Kuhnle 2018)

Liebrecht, C. & Kuhnle, A. (2018), „Einführungsstrategien und Risiko-Potentialbewertung“ in *Industrie 4.0 für die Praxis. Befähigungs- und Einführungsstrategien*, Hrsg. G. Lanza & P. Nyhuis, TEWISS-Technik und Wissen GmbH, Garbsen, S. 203–212.

(Liebrecht & Schaumann et al. 2018)

Liebrecht, C.; Schaumann, S.; Zeranski, D.; Antoszkiewicz, A. & Lanza, G. (2018), „Analysis of Interactions and Support of Decision Making for the Implementation of Manufacturing Systems 4.0 Methods“. 10th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems, IPS<sup>2</sup> 2018, 29-31 May 2018, Linköping, Sweden, *Procedia CIRP*, 73, S. 161–166.

(Liebrecht & Schwind et al. 2017)

Liebrecht, C.; Schwind, J.; Grahm, M. & Lanza, G. (2017), „A three-step transformation process for the implementation of Manufacturing Systems 4.0 in medium-sized enterprises“. *7. WGP-Jahreskongress Aachen, 5.-6. Oktober 2017*, Hrsg. R. H. Schmitt & G. Schuh, Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen, S. 261–270. ISBN: 978-3-86359-555-5.

(Liebrecht & Zeranski et al. 2018)

Liebrecht, C.; Zeranski, D. & Lanza, G. (2018), „Analyse der Wirkzusammenhänge und Entscheidungsunterstützung für den Industrie-4.0-Methodeneinsatz“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(1-2), S. 79–82.

(Moser & Stricker et al. 2016)

Moser, E.; Stricker, N.; Liebrecht, C.; Hiller, A.; Ziegler, M. & Lanza, G. (2016), „Preparation of Papers for IFAC Conferences & Symposia: Migration Planning for Global Production Networks using Markovian Decision Processes“. 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, 28-30 June 2016, Troyes, Frankreich, *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), S. 35–40.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Industrie 4.0 – Potentiale und Herausforderungen	2
Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit und Strukturierung der Kapitel	5
Abbildung 2-1: Abgrenzung Industrie 4.0	9
Abbildung 2-2: Darstellung der Eignung von Methoden	11
Abbildung 2-3: Zielsystem und Zielgrößen für Industrie 4.0-Methoden	13
Abbildung 2-4: Methodische Ansätze der Investitionsbewertung	16
Abbildung 2-5: Verfahren der Investitionsrechnung	17
Abbildung 2-6: Hierarchischer Aufbau einer Entscheidungssituation	21
Abbildung 2-7: Neun-Punkte-Skala von Saaty	22
Abbildung 2-8: Dichtefunktionen der Dreiecks- und PERT-Beta-Verteilung	27
Abbildung 2-9: Ablauf einer Simulation	29
Abbildung 2-10: Methoden der Simulationsmodellierung	29
Abbildung 4-1: Allgemeiner Lösungsansatz	52
Abbildung 4-2: Vorgehen und Ergebnisse von Kapitel 4.1	54
Abbildung 4-3: Rahmenmodell – Industrie 4.0-Methodenkategorien und Ziele	55
Abbildung 4-4: Methoden-Toolbox	58
Abbildung 4-5: Beispielhafter Methodensteckbrief	60
Abbildung 4-6: Arten der Beziehungen zwischen Industrie 4.0-Methoden	62
Abbildung 4-7: Methodenbeziehungen und Methodenstrang	63
Abbildung 4-8: Vorgehen bei Erarbeitung der Datengrundlage	64
Abbildung 4-9: Exemplarische Interdependenzmatrix für den Potentialmethodenstrang „Auftragsvisualisierung“	66
Abbildung 4-10: Visuelle Darstellung des Potentialmethodenstrangs	67
Abbildung 4-11: Vorgehen und Ergebnisse von Phase 1 der Methodik	68
Abbildung 4-12: Merkmale und Merkmalsausprägungen	69
Abbildung 4-13: Methodeneignung nach Produktionstypologien	73

---

Abbildung 4-14: Exemplarisches Methodennetz der Produktionstypologie „Fokus auf Variantenzahl bei manueller Produktion“	75
Abbildung 4-15: Vorgehensmodell Methodik Phase 1	76
Abbildung 4-16: Vorgehen und Ergebnisse von Phase 2 der Methodik	77
Abbildung 4-17: Übersicht strategischer Kriterienkatalog	79
Abbildung 4-18: Exemplarische Paarvergleichsmatrix	80
Abbildung 4-19: Aufbau der Nutzwertanalyse	82
Abbildung 4-20: Übersicht monetärer Kriterienkatalog	84
Abbildung 4-21: Berechnungsvorschrift für periodische Ausgaben der Methode „Verfügbarkeit von Echtzeitdaten“	85
Abbildung 4-22: Exemplarische Monte-Carlo-Simulation des Kapitalwerts	87
Abbildung 4-23: Normierte und gewichtete Entscheidungsmatrix	89
Abbildung 4-24: Beispielhafte Priorisierung von Methodensträngen	89
Abbildung 4-25: Exemplarische Einführungsszenarien	91
Abbildung 4-26: Vorgehensmodell Methodik Phase 2	93
Abbildung 4-27: Vorgehen und Ergebnisse von Phase 3 der Methodik	94
Abbildung 4-28: Aufwandskategorien	95
Abbildung 4-29: Implementierungsintensitätsgradient (IIG)	96
Abbildung 4-30: Technologischer Reifegrad (TRG)	97
Abbildung 4-31: Umsetzungsgrad (UG)	98
Abbildung 4-32: Bewertungsskala der Zielgrößen	99
Abbildung 4-33: Bewertungsskala und Simulationsskalen	100
Abbildung 4-34: Übersicht Modellierungsparameter	101
Abbildung 4-35: Gewichtung der Modellierungsparameter IIG, TRG und UK	102
Abbildung 4-36: Kurvenfaktoren	103
Abbildung 4-37: Zusammenhang zwischen Implementierungsdauer, Modellierungsparametern und Umsetzungsgrad	104

---

Abbildung 4-38: Wirkzusammenhänge des Simulationsmodells	105
Abbildung 4-39: Beispielhafter Zeit-Umsetzungsgrad-Graph	106
Abbildung 4-40: Beispielhaftes Gantt-Diagramm	107
Abbildung 4-41: Beispielhafte spezifische Industrie 4.0-Roadmap	110
Abbildung 4-42: Simulationsergebnis des Experimentierplans im allgemeinen Fall	111
Abbildung 4-43: Simulationsergebnis des Experimentierplans bei Gewichtung 50/50 im allgemeinen Fall	112
Abbildung 4-44: Empfohlene Industrie 4.0-Roadmap	114
Abbildung 4-45: Vorgehensmodell Methodik Phase 3	115
Abbildung 5-1: Produktionstypologie „Fokus auf Variantenzahl bei manueller Produktion“	118
Abbildung 5-2: Industrie 4.0-Methodennetz des Anwendungspartners nach spezifischen Anpassungen	120
Abbildung 5-3: Industrie 4.0-Vision des Anwendungspartners	122
Abbildung 5-4: Spezifischer Steckbrief der Methode „Papierlose Fertigung“	123
Abbildung 5-5: Ausgewählte Kriterien des Anwendungspartners	124
Abbildung 5-6: Relatives Strategiepotehtial der Methoden	125
Abbildung 5-7: Kapitalwertberechnung	127
Abbildung 5-8: Kapitelwerte der betrachteten Methoden	128
Abbildung 5-9: Simulationsergebnis des Experimentierplans des Anwendungspartners	130
Abbildung 5-10: Simulationsergebnisse des Experimentierplans bei Gewichtung 70/30 des Anwendungspartners	131
Abbildung 5-11: Implementierungsreihenfolgen ausgewählter Szenarien	132
Abbildung 5-12: Industrie 4.0-Roadmap des Anwendungspartners	133
Abbildung 5-13: Prototypische Softwareumsetzung	135
Abbildung 5-14: Graphische Oberfläche des Visualisierungstools	136

---

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 3-1: Übersicht relevanter Forschungsansätze	48
Tabelle 6-1: Bewertung des vorgestellten Lösungsansatzes hinsichtlich der ermittelten Anforderungen aus der industriellen Praxis	138

## Anhang







### Anhang A: Ausprägungen der Anforderungskriterien

<b>Ausprägung</b> <b>Anforderung</b>	nicht berücksichtigt <input type="checkbox"/>	ansatzweise berücksichtigt <input type="radio"/>	umfassend berücksichtigt <input checked="" type="radio"/>
1) Strukturierung von Lean- und Industrie 4.0-Methoden (FF 1.1)	Es ist kein Rahmenmodell vorhanden und keine Beschreibung einer funktionale Ebene von einer Lean- oder einer Industrie 4.0-Methoden-Toolbox existiert.	Entweder ist ein Rahmenmodell vorhanden, oder eine Beschreibung einer vollständigen Lean-, aber unvollständigen Industrie 4.0-Methoden-Toolbox liegt vor.	Ein Rahmenmodell ist vorhanden und Beschreibung der funktionalen Ebene der Methoden einer Industrie 4.0-Methoden-Toolbox liegt vor.
2) Verknüpfung mit einer Lean- und Industrie 4.0-Methoden-Toolbox (FF 1.2)	Es ist keine Methoden-Toolbox vorhanden.	Einzelne öffentliche, zugängliche Methoden zur Veranschaulichung liegen vor.	Eine vollständige Methoden-Toolbox zu verschiedenen Bereichen, die auch vorliegt und öffentlich zugänglich ist, ist verfügbar.
3) Wirkzusammenhänge Lean- und Industrie 4.0-Methoden (FF 2.1)	Keine Berücksichtigung von Wirkzusammenhängen aufgrund technologischer oder organisatorischer Abhängigkeiten.	Vollständige Berücksichtigung von Wirkzusammenhängen einer Lean-Methoden-Toolbox oder teilweise Berücksichtigung von Wirkzusammenhängen einer Industrie 4.0-Methoden-Toolbox.	Vollständige Berücksichtigung von Wirkzusammenhängen einer Industrie 4.0-Methoden-Toolbox.
4) Produktionsrelevante Zielgrößen (FF 2.2)	Keine Berücksichtigung von produktionsrelevanten Zielgrößen.	Teilweise Berücksichtigung von produktionsrelevanten Zielgrößen.	Durchgängigkeit in der Berücksichtigung von produktionsrelevanten Zielgrößen ist gegeben.
5) Strategische Bewertungsanforderungen bzgl. Industrie 4.0 (FF 3.1)	Keine Berücksichtigung von strategischen, unternehmensspezifischen Zielen und Strategien.	Berücksichtigung von strategischen, unternehmensspezifischen Zielen und Strategien aus Teilbereichen des Unternehmens.	Entwicklung einer Industrie 4.0-Strategie in Einklang mit Unternehmenszielen und -strategie.
6) Modell- und Bewertungsanforderungen für monetäre und strategische Aspekte (FF 3.2)	Keine Berücksichtigung von monetären Kosten, strategischem Aufwand oder Unsicherheiten in der Bewertung.	Berücksichtigung von Investitionskosten, strategischem Aufwand oder Unsicherheiten in der Bewertung.	Berücksichtigung der Kosten über den gesamten Lebenszyklus, des strategischen Aufwands und Unsicherheiten im Rahmen der Bewertung.
7) Systematisches und transparentes Auswahlverfahren	Keine Transparenz und Systematik ersichtlich.	Transparenz und Systematik zum Teil gegeben, Nachvollziehbarkeit aber eingeschränkt.	Transparenz und Systematik ersichtlich, Nachvollziehbarkeit gegeben.
8) Implementierungsreihenfolgen (FF 4)	Kein Vorschlag zur Implementierungsreihenfolge von Methoden gegeben.	Implementierungsreihenfolge von Methoden basierend auf bestimmten Nutzen und Kosten.	Implementierungsreihenfolge von Methoden basierend auf Ergebnissen einer Simulation, Zielgrößen sowie unter Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Strategie.

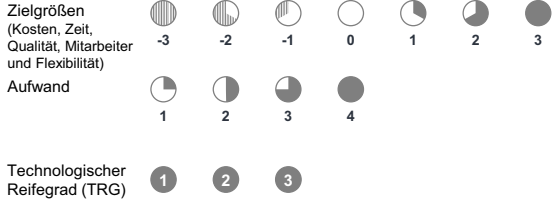
## Anhang B: Methodensteckbriefe

**Legende:**

























Kategorien:

-  Enabler
-  Daten
-  Mensch
-  Assistenzsysteme und Visualisierung
-  Vernetzung und Transparenz
-  Selbstorganisation und Dezentralisierung

Skalen:



### Methodensteckbriefe 1/16

Beschreibung		Bewertung			
Auftragsvisualisierung	Die Auftragsplanung wird an Bildschirmen in der Fertigung übersichtlich visualisiert. Aufträge werden unter Berücksichtigung begrenzter Kapazitäten den entsprechenden Ressourcen zugeordnet. Die höhere Transparenz und der erweiterte Planungshorizont hilft u. a., Liefertermine zuverlässig einzuhalten und Rüstzeiten durch Zusammenfassen ähnlicher Aufträge zu reduzieren. Mitarbeiter können durch die Visualisierung der Aufträge in Echtzeit reagieren und sich immer direkt an die geforderten Gegebenheiten anpassen.	Kategorie	 4	TRG	 3
		Abkürzung	AV		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
		Aufwand			
Aus- und Weiterbildung	In Zeiten von Industrie 4.0 benötigen Mitarbeiter weitreichende Kompetenzen, für welche sie ausgebildet werden müssen. Abgesehen davon bietet die Industrie 4.0 auch für die allgemeine Weiterbildung der Mitarbeiter gute Möglichkeiten, zum Beispiel durch den Einsatz von Online-Schulungen, Simulationen oder Virtual Reality, über welche die Mitarbeiter für die Tätigkeiten an der realen Maschine geschult werden können.	Kategorie	 3	TRG	 3
		Abkürzung	AUW		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
		Aufwand			
Automatische Planung und Optimierung der Produktion	Ein Produktionsplanungstool plant und optimiert die Produktion autonom unter Berücksichtigung von Kundenwünschen, Ressourcenverfügbarkeit und Echtzeitdaten. Entscheidungen werden autonom und ausschließlich informationsbasiert getroffen. Das System kann flexibel auf Veränderungen reagieren und visualisiert die aktuellen Prozessdaten in Echtzeit. Die Priorisierung von Aufträgen wird mit Echtzeitdaten umgesetzt.	Kategorie	 6	TRG	 1
		Abkürzung	APOP		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
		Aufwand			

**Methodensteckbriefe 2/16**

Beschreibung		Bewertung			
Autonome Transportfahrzeuge	Moderne Sensorik, die durchgehende Verfügbarkeit von Informationen und eine konsequente Vernetzung ermöglichen den Einsatz von autonomen Transportfahrzeugen. Diese können sowohl untereinander als auch mit den Produktionssystemen kommunizieren und finden selbständig den Weg zu ihrem Zielort. Dabei optimieren sie Wege und Fahrzeiten, um noch kosteneffizienter ihre Zielorte zu erreichen.	Kategorie	6	TRG	2
		Abkürzung	ATF		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Bedarfsgerechte Informationen durch Filterung	Durch die Digitalisierung werden große Mengen an Daten und Informationen geschaffen, sodass ein schnelles Suchen und Finden nicht mehr gegeben ist. Auf Grundlage von Analyse-Verfahren soll ein gezieltes Suchen und Filtern von Informationen ermöglicht werden. Komplexe Sachverhalte können so abstrahiert und auf das Geforderte reduziert werden. Dies bildet die Grundlage, um Mitarbeiter mit bedarfsgerechten Informationen zu versorgen und so bspw. beim Treffen von Entscheidungen zu unterstützen.	Kategorie	2	TRG	2
		Abkürzung	BIF		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Bedarfsgerechte Versorgung von Produktionsanlagen	Heutzutage erfolgt die Versorgung von Produktionsanlagen meist mit statistischen Systemen. Diese Systeme sind jedoch nicht auf die zukünftige Dynamik ausgelegt und für den Anwender nicht transparent genug. Intelligente Sensoren erfassen alle relevanten Daten in der Produktion, sammeln diese in einer Datenbank und können damit den Bedarf von Produktionsanlagen eigenständig erkennen.	Kategorie	5	TRG	3
		Abkürzung	BVPA		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Change-Management	Der anstehende Paradigmenwechsel im Zuge der Einführung von Industrie 4.0 erfordert viele Veränderungen und Ressourcen zur Implementierung von neuen Verfahren, Prozessen und Strategien. Für diesen Wandlungsprozess benötigen die Unternehmen Hilfestellungen und konkrete Umsetzungsstrategien, da der aktuell laufende Betrieb sonst erheblich beeinträchtigt wird.	Kategorie	3	TRG	3
		Abkürzung	CM		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					



**Methodensteckbriefe 3/16**

Beschreibung		Bewertung	
Cyberschutz von gespeicherten Daten bzw. Organisatorische und kommunikative IT-Sicherheit	Cyberschutz von gespeicherten Daten bezeichnet den angemessenen Schutz sensibler Produktionsdaten, die im Zuge von Industrie 4.0 in großem Maße erfasst oder durch die Vernetzung zugänglich werden. Zum Schutz des Unternehmens- bzw. Produkt-Know-hows ist es zwingend notwendig, die Datensouveränität durch entsprechenden Cyberschutz innezuhaben. Cyberschutz umfasst hier innere Sicherheitsmaßnahmen (wie beschränkte und verfolgbare Zugriffsrechte), die Schulung und Sensibilisierung aller Mitarbeiter sowie eine klare Kommunikation der internen Verhaltensregeln zur Informationssicherheit.	Kategorie	2 TRG 3
		Abkürzung	CSD
		Kosten	<input type="radio"/> Zeit <input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/> Mitarbeiter <input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>
Aufwand	<input type="radio"/>		
Data Security von Anlagen/ Systemen bzw. Technische IT-Sicherheit	Durch die Vernetzung aller Anlagen und Systeme im Unternehmen und über Grenzen hinweg, ist der Know-how-Schutz äußerst wichtig. Data Security von Anlagen/ Systemen bezeichnet den Schutz gegen unberechtigte Zugriffe von außen (z. B. durch die Absicherung der Netzwerkverbindungen über Firewalls sowie den Schutz vor Schadsoftware) und das Sicherstellen regelmäßiger Updates der Sicherheitssysteme.	Kategorie	2 TRG 3
		Abkürzung	DSAS
		Kosten	<input type="radio"/> Zeit <input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/> Mitarbeiter <input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>
Aufwand	<input type="radio"/>		
Datenaufnahme, Design und Klassifizierung	Um eine Datenauswertung möglich zu machen, müssen alle relevanten Daten aufgenommen werden. Hierzu muss im Vorhinein festgelegt werden, welche Daten wo, wann und wie aufgenommen werden sollen (Sensorik, Format, Schnittstellen). Um die Daten effizient weiterzuverarbeiten, müssen sie nach bestimmten Gruppen oder Attributen gegliedert werden (Klassifizierung). Jede Datengruppe hat gleiche Eigenschaften, die durch Metadaten kategorisiert werden.	Kategorie	2 TRG 3
		Abkürzung	DDK
		Kosten	<input type="radio"/> Zeit <input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/> Mitarbeiter <input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>
Aufwand	<input type="radio"/>		
Digitale Ferndiagnose von Produktionsanlagen	Die heute genutzten Informationstechnologien zur Datenerfassung laufen meist nach Bereichen getrennt ab. Instandhaltungssysteme müssen derzeit oft auf unterschiedliche Systeme zugreifen. Diese werten Maschineninformationen aus und geben so eine Rückmeldung über den aktuellen Zustand. Die digitale Ferndiagnose von Produktionsanlagen als outgesourcter Dienst stellt einen Service dar, der Vernetzung und Kommunikation der Produktionsanlagen voraussetzt, sodass der Zugriff gewährleistet ist und Diagnosen über die Anlage erstellt werden können.	Kategorie	5 TRG 2
		Abkürzung	DFPA
		Kosten	<input type="radio"/> Zeit <input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/> Mitarbeiter <input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>
Aufwand	<input type="radio"/>		

**Methodensteckbriefe 4/16**

Beschreibung		Bewertung			
Digitale Kommunikation zwischen Mitarbeitern	Fehlende Informationen führen zu Ineffizienz. Um Prozesse in der Produktion so effektiv wie möglich zu gestalten, ist es nötig, die Kommunikation nicht nur zwischen Mensch und Maschine, sondern auch zwischen den Mitarbeitern zu verbessern. Da moderne Produktionsumgebungen nicht nur flexibel gestaltet sein müssen, um schnell auf Änderungen eingehen zu können, sondern auch eine steigende Mobilität im Werk ermöglichen, nehmen in diesem Zusammenhang z. B. Wearables in der Produktion einen wichtigen Stellenwert ein.	Kategorie	5	TRG	3
		Abkürzung	DKZM		
		Kosten	<input type="radio"/>	Zeit	<input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/>	Mitarbeiter	<input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>		
		Aufwand	<input type="radio"/>		
Digitale Layoutplanung und Digitales Fabrikmodell	Prozessdaten sind digital hinterlegt und können durch einen modularen Aufbau neu geplant werden. Die Rahmendaten des Produktionsgeländes und der eingesetzten Maschinen müssen ebenfalls in einem Softwaretool hinterlegt sein, um die Planung durchzuführen. Auf Basis dieser Prozess- und Ressourcendaten können verschiedene Layoutvarianten simuliert und gezielte Verbesserungen vorgenommen werden. Die finale Version der Layoutgestaltung kann als digitales Fabrikmodell visualisiert werden.	Kategorie	5	TRG	2
		Abkürzung	DLDF		
		Kosten	<input type="radio"/>	Zeit	<input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/>	Mitarbeiter	<input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>		
		Aufwand	<input type="radio"/>		
Digitale Skillmatrix und Digitale Mitarbeiterzuordnung	Transparenz über das im Unternehmen vorhandene Wissen und Know-how wird immer wichtiger. Um einen Überblick über die Potentiale und das Wissen der Mitarbeiter zu bekommen, können diese Informationen in einer digitalen Skillmatrix erfasst werden. Dies ermöglicht beispielsweise die automatische Zuordnung von Mitarbeitern zu Prozessen oder den gezielten Wissensaustausch. Des Weiteren kann durch eine Gap-Analyse der Fort- und Weiterbildungsbedarf jedes Mitarbeiters identifiziert werden.	Kategorie	3	TRG	3
		Abkürzung	DSDM		
		Kosten	<input type="radio"/>	Zeit	<input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/>	Mitarbeiter	<input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>		
		Aufwand	<input type="radio"/>		
Digitale Visualisierung von Maschinenzuständen	Die Vorgänge an den Produktionsanlagen (z. B. Rüstvorgänge, durchzuführende Wartungsarbeiten) werden an Bildschirmen in der Fertigung übersichtlich visualisiert. In diesem Zusammenhang werden alle Maschinenzustände erfasst und dargestellt. Mitarbeiter werden dabei in ihren Tätigkeiten mit Informationen unterstützt.	Kategorie	4	TRG	3
		Abkürzung	DVMZ		
		Kosten	<input type="radio"/>	Zeit	<input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/>	Mitarbeiter	<input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>		
		Aufwand	<input type="radio"/>		

**Methodensteckbriefe 5/16**

Beschreibung		Bewertung	
Digitale Wartungsinformationen per AR	Eine Software für die industrielle Wartung bündelt die vorhandenen Informationen und stellt sie mittels einer Augmented Reality (AR) - Oberfläche auf mobilen Endgeräten zur Verfügung. Dafür wird eine integrierte digitale Produktdatenbank benötigt. Zusätzlich muss die Umgebung erkannt werden, damit jeweils objektspezifische Wartungsinformationen ausgegeben werden.	Kategorie	4 TRG 2
		Abkürzung	DWI
		Kosten	Zeit
		Qualität	Mitarbeiter
		Flexibilität	
Aufwand			
Digitales Shopfloor Management	Durch aktuelle IoT-Technologien bietet sich die Möglichkeit, komplexe Strukturen und Prozesse des Shopfloor Managements durch digitale Lösungen sowohl effektiver als auch effizienter zu gestalten. Die Erfassung, Aggregation und Clusterung von quantitativen und qualitativen Prozessdaten ermöglichen übersichtliche Visualisierungen und präzise Steuerungseingriffe des Managements über Mensch-Maschinen-Schnittstellen. Die abstrakten Ergebnisse der Produktion werden auf Monitoren für jeden ersichtlich dargestellt. Schnelles Erkennen und Reagieren ist möglich.	Kategorie	5 TRG 2
		Abkürzung	DSM
		Kosten	Zeit
		Qualität	Mitarbeiter
		Flexibilität	
Aufwand			
Digitalisierung der Personaleinsatzplanung	Die Digitalisierung der Personaleinsatzplanung und des gesamten Personalmanagements macht es möglich, kurzfristige Änderungen in der Fertigung schneller zu realisieren. Die Personaleinsatzplanung wird parallel zur Produktion und entsprechend der Kundenaufträge durchgeführt. Die die Personaleinsatzplanung betreffenden Informationen liegen ausschließlich digital vor.	Kategorie	2 TRG 3
		Abkürzung	DPEP
		Kosten	Zeit
		Qualität	Mitarbeiter
		Flexibilität	
Aufwand			
Durchgängigkeit von IT-Systemen	Derzeit bestehen in Unternehmen viele Insellösungen in Form von eigenständigen Softwarelösungen oder Applikationen. Die Vernetzung dieser Systeme ist ein essentieller Schritt, um konsistente Daten zu gewährleisten. Dies gilt sowohl innerhalb Unternehmen als auch über Unternehmensgrenzen hinweg. Ein wichtiger Schritt zur Umsetzung durchgängiger IT-Systeme stellt die Vereinbarung von einheitlichen Schnittstellen dar.	Kategorie	2 TRG 3
		Abkürzung	DITS
		Kosten	Zeit
		Qualität	Mitarbeiter
		Flexibilität	
Aufwand			

**Methodensteckbriefe 6/16**

Beschreibung		Bewertung			
Echtzeitfeedback	Echtzeitfeedback unterstützt die Mitarbeiter dadurch, dass sie eine direkte Rückmeldung zu ihren Eingaben bzw. Handlungen durch die Maschine oder durch mobile Endgeräte erhalten (bspw. Smart Glasses als Unterstützung im Montageprozess). Führen Mitarbeiter Prozessschritte nicht korrekt aus, können sie z. B. audiovisuell darauf aufmerksam gemacht werden und ihre Fehler unmittelbar korrigieren. Die Anwendung beschränkt sich nicht nur auf Prozessschritte, sondern kann auch auf Planungsvorgänge ausgeweitet werden.	Kategorie	4	TRG	3
		Abkürzung	EF		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Eindeutige und sichere Identitätsnachweise für Produkte, Prozesse und Maschinen	Um den sicheren Informationsaustausch zu ermöglichen, ist es notwendig, die individuellen Maschinen, Prozesse, Produkte, Komponenten und Materialien eindeutig, elektronisch identifizieren zu können. Dabei machen Identitätsnachweise (QR-Codes, RFID-Tags) Produkte, Prozesse und Maschinen individuell und eindeutig identifizierbar.	Kategorie	1	TRG	3
		Abkürzung	ESIN		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Einsatz cyber-physischer Systeme bzw. Ausstattungen von Objekten mit Kleincomputern	Das cyber-physische System (CPS) bezeichnet den Verbund softwaretechnischer Komponenten mit mechanischen und elektronischen Teilen (Hardwarekomponenten). Grundlage für den Einsatz von CPS ist das Ausstatten von Objekten mit Kleincomputern, was auch als "Embedded System" bezeichnet wird. Dies führt zu dem Trend, dass immer weniger Großrechner und immer mehr kleine, intelligente Objekte verwendet werden. Die Kommunikationsfähigkeit der CPS wird durch die zusätzliche Vernetzung über eine Dateninfrastruktur (wie z. B. dem Internet) geschaffen. CPS sind der wesentliche Bestandteil cyber-physischer Produktionssysteme.	Kategorie	1	TRG	3
		Abkürzung	ECS		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Erarbeiten von Kompetenzprofilen	Durch Industrie 4.0 ändern sich die Anforderungen an Mitarbeiter drastisch. Deshalb muss für alle Positionen in Unternehmen neu definiert werden, welche Anforderungspotentiale und Kompetenzen erforderlich sind. Darauf aufbauend kann die Aus- und Weiterbildung der Mitarbeiter gestaltet werden.	Kategorie	3	TRG	3
		Abkürzung	EKP		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					

**Methodensteckbriefe 7/16**

Beschreibung		Bewertung			
Erfassung von Prozessdaten (u. a.) durch Maschinen und Werkzeuge	Die Methode bezeichnet die grundlegende Ausstattung von Maschinen, Werkzeugen und Prozessen mit Sensorik, die die Erfassung von Prozessdaten ermöglicht. Dazu gehören zum Beispiel Fertigmeldungen, Störungen und Stückzahlen. Dies bildet die Grundlage für eine echtzeitbasierte Steuerung der Produktionsanlagen. Alle Daten sind ausschließlich digital verfügbar und zentral gespeichert.	Kategorie	1	TRG	3
		Abkürzung	EPD		
		Kosten	<input type="radio"/>	Zeit	<input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/>	Mitarbeiter	<input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>		
Aufwand	<input type="radio"/>				
Erstellung digitaler Anlageninformationen	Zum Zweck einer autonom gesteuerten Produktion müssen alle Daten digital und in Echtzeit vorliegen. Gerade durch die steigende Anzahl an individuellen Produktionsaufträgen ist es wichtig, dass immer die aktuellsten verfügbaren Daten vorliegen. Bei Anlagenumbauten müssen bspw. Anpassungen an der technischen Dokumentation vorgenommen und dokumentiert werden. Zukünftig werden immer mehr solcher Anpassungen erfolgen, da flexible Produktionssysteme eingesetzt werden. Informationen über die Maschinen, wie durchgeführte Umbauten, die aktuelle Konfiguration, aber auch abgeschlossene Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten, sollten deshalb gebündelt und in digitaler Form dokumentiert werden.	Kategorie	2	TRG	3
		Abkürzung	EDAI		
		Kosten	<input type="radio"/>	Zeit	<input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/>	Mitarbeiter	<input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>		
Aufwand	<input type="radio"/>				
Erstellung digitaler Arbeitsanweisungen	Die Methode beschreibt die Bereitstellung digitaler Arbeitsunterlagen wie z. B. Montagefolgen, Sicherheitshinweise, Qualitätsinformationen oder Wartungs- und Instandhaltungsanleitungen. Dies bildet die Grundlage, um den Mitarbeitern möglichst einfach und schnell, jederzeit und überall die Informationen zur Verfügung zu stellen, die sie gerade benötigen.	Kategorie	2	TRG	3
		Abkürzung	EDAA		
		Kosten	<input type="radio"/>	Zeit	<input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/>	Mitarbeiter	<input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>		
Aufwand	<input type="radio"/>				
Erstellung digitaler Werkzeuginformationen	Um Werkzeuge optimal einsetzen zu können, müssen diese innerhalb der vorgegebenen Betriebsgrenzen genutzt werden. Diese Daten liefert der Hersteller meist auf der physischen Werkzeugbegleitkarte. Alle Daten werden fortan ausschließlich digital erfasst und stehen für Informationen über das Werkzeug zur Verfügung.	Kategorie	2	TRG	3
		Abkürzung	EDWI		
		Kosten	<input type="radio"/>	Zeit	<input type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/>	Mitarbeiter	<input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>		
Aufwand	<input type="radio"/>				

**Methodensteckbriefe 8/16**

Beschreibung		Bewertung			
Flexibilisierung von Produktionssystemen bzw. Plug & Produce	Um hochindividualisierte Produkte herzustellen (bis hin zur Losgröße 1), bieten sich modular aufgebaute Produktionssysteme an. Durch eine hohe Flexibilität der Systeme kann optimal auf individuelle Wünsche des Kunden reagiert werden und einzelne Prozess- und Produktionsschritte lassen sich je nach Bedarf anpassen, ohne dabei Produktivitätseinbußen zu riskieren. Produkteinführungen erfordern weniger Zeit und Systemausfälle können schnell kompensiert werden. Das System erkennt eigenständig Änderungen in der Auftragslage und passt sich entsprechend an.	Kategorie	6	TRG	2
		Abkürzung	FLPS		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Führen durch den Prozess	Diese Methode beschreibt Anwendungen, welche die Mitarbeiter digital durch die Prozesse führt und anleitet, wodurch die Prozessqualität gesteigert werden kann. Dies kann durch verschiedene technische Hilfsmittel und die bedarfsgerechte Bereitstellung von Arbeitsanweisungen umgesetzt werden.	Kategorie	4	TRG	3
		Abkürzung	FDP		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Homogenisierung von Kommunikationsprotokollen	Die Methode soll die Vernetzung der Systemkomponenten vereinfachen, indem herstellerunabhängige, offene M2M-Kommunikationsprotokolle (wie z. B. OPC-UA) verwendet werden. Anlagen- und Steuerungsinformationen können so ausgelesen und in ein standardisiertes Format überführt werden, aus dem alle relevanten Informationen zur automatischen Konfiguration von produktionsnahen IT-Systemen (z. B. Produktionsplanungs- oder ERP-System) abgeleitet werden können. Durch die Verwendung einheitlicher Kommunikationsstandards können bspw. Systemkomponenten flexibel ausgetauscht und kombiniert werden, sodass eine höhere Modularität in der Produktion erreicht wird. Die allgemeine Datenverfügbarkeit wird ebenfalls erhöht.	Kategorie	1	TRG	3
		Abkürzung	HKP		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Integration bestehender Produktionsanlagen	Um die Digitalisierung der Produktion voranzutreiben, bedarf es nicht zwingend neuer Maschinen und Anlagen. Durch die Integration aktueller IT-Systeme können benötigte Schnittstellen geschaffen und neue Sensoren für die Erfassung von Produktionsdaten eingebaut werden, sodass eine kontinuierliche Datenaufnahme besteht. Elemente zur Datenvisualisierung und Prozessführung können nachgerüstet werden. Weitere konvergierende Technologien, die für die Kommunikation benötigt werden, können integriert werden, was neben Sensoren auch Aktoren betreffen kann. Alle Daten, die über die Anlage generiert werden, sind digital verfügbar.	Kategorie	1	TRG	3
		Abkürzung	IPA		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					

**Methodensteckbriefe 9/16**

Beschreibung		Bewertung			
<b>Integrierter Änderungsprozess</b>	<p>In einer Umgebung, in der dem Mitarbeiter Arbeitsanweisungen und Zeichnungen in digitaler Form bereitgestellt werden, ist ebenfalls ein Kommunikations- und Informationskanal integriert, der dem Workflow entgegengesetzt gerichtet ist. Dem Mitarbeiter wird so eine Benutzeroberfläche geboten, über die Änderungsvorschläge zu den Prozessen angestoßen werden können, sodass der Mitarbeiter Änderungen schnell und einfach realisieren und diese durch die Maschinen-Interaktion auch direkt integriert werden kann. Im weiteren Verlauf unterstützt die Technologie den Mitarbeiter mit vielen Workflow-Funktionalitäten.</p>	<b>Kategorie</b>	4	<b>TRG</b>	2
		<b>Abkürzung</b>	IAEP		
		<b>Kosten</b>		<b>Zeit</b>	
		<b>Qualität</b>		<b>Mitarbeiter</b>	
		<b>Flexibilität</b>			
<b>Aufwand</b>					
<b>Intelligente Anlagenüberwachung und -diagnose</b>	<p>Maschinenüberwachung findet durchweg statt, sodass ein genaues Abbild der Maschinen und ihrer Zustände jederzeit ersichtlich ist. Mittels Datenanalysen lassen sich die Anlagen im laufenden Betrieb zuverlässig überwachen und intelligente Diagnosen mit Trendanalysen erstellen, die präventiv wirken können. Dazu werden aktuelle Sensorinformationen mit Informationen früherer Fehler korreliert und ausgewertet. Die Reports geben aber nicht nur einen Überblick über das Betriebsverhalten und Kennzahlen einer Anlage – auch wird im Störfall unmittelbar durch aktives Alarmmanagement reagiert. Ursachen von Störungen werden erkannt und können gezielt lokalisiert werden.</p>	<b>Kategorie</b>	5	<b>TRG</b>	2
		<b>Abkürzung</b>	IAUD		
		<b>Kosten</b>		<b>Zeit</b>	
		<b>Qualität</b>		<b>Mitarbeiter</b>	
		<b>Flexibilität</b>			
<b>Aufwand</b>					
<b>Intelligente Behälter</b>	<p>Die intelligenten Behälter übermitteln kontinuierlich den Bestand an Teilen (z. B. B- und C-Teile) im Lager und in der Produktion des Kunden (gemessen durch Gewichtsermittlung oder per Kamera). Diese Daten werden ausgewertet und automatisch der entsprechende Nachschub geliefert – je nach Leistungsdefinition auch direkt an den Arbeitsplatz. Die Behälter können zudem mit einem elektronischen Etikett versehen werden, welches Informationen über Lieferstatus und -menge enthält – selbst bei einem niedrigen Lagerbestand erübrigen sich dadurch die ansonsten üblichen Nachfragen bei der Einkaufsabteilung. Mit Hilfe einer Software können diese Daten in Echtzeit aufgenommen werden.</p>	<b>Kategorie</b>	5	<b>TRG</b>	3
		<b>Abkürzung</b>	IB		
		<b>Kosten</b>		<b>Zeit</b>	
		<b>Qualität</b>		<b>Mitarbeiter</b>	
		<b>Flexibilität</b>			
<b>Aufwand</b>					
<b>Intelligente Datenerhebung</b>	<p>In der klassischen Definition ist ein Sensor ein Element, das aus einer physikalischen Größe ein meist analoges elektrisches Signal erzeugt. Inzwischen entwickeln sich einfache Sensoren zu höher integrierten und intelligenten Systemen mit Selbstabgleich, Selbstüberwachung und digitaler Signalverarbeitung (z. B. Smart Cameras). Häufig werden nicht mehr analoge Messwerte an die lokale höhere Steuerungsebene übertragen, sondern digitale System- oder Störgrößen an zum Teil weit entfernte Überwachungszentralen. Die Dezentralisierung intelligenter Funktionen, das heißt ihre Verlagerung vom Automatisierungssystem in die Feldgeräte, ist ein zukunftssicherer Ansatz, um Automatisierungsnetzwerke effizienter und performanter zu gestalten.</p>	<b>Kategorie</b>	1	<b>TRG</b>	3
		<b>Abkürzung</b>	IDE		
		<b>Kosten</b>		<b>Zeit</b>	
		<b>Qualität</b>		<b>Mitarbeiter</b>	
		<b>Flexibilität</b>			
<b>Aufwand</b>					

**Methodensteckbriefe 10/16**

Beschreibung		Bewertung			
Intelligente Kommunikation zwischen Maschinen und Mitarbeitern	Produktionsdaten von Maschinen können über mobile Geräte direkt eingesehen werden. Beim Auftreten von Unregelmäßigkeiten oder einer Störung benachrichtigt das System automatisch den zuständigen Mitarbeiter (z. B. per App). Eine Beschreibung des Fehlers sowie notwendige Anlageninformationen (z. B. technische Dokumentation) werden bereitgestellt. In Absprache mit dem Mitarbeiter können so direkt verschiedene Gegenmaßnahmen eingeleitet werden (z. B. Abschaltung einzelner Anlagenkomponenten oder Anpassung der Regelungsparameter).	Kategorie	4	TRG	2
		Abkürzung	IKMM		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Intelligente Palette	Standardisierte Ladungsträger werden z. B. mit Elementen zur drahtlosen Identifikation (RFID) ausgestattet und in mit Empfängern ausgerüsteten, intelligenten Regalen abgelegt. Werkstücke können somit jederzeit eindeutig lokalisiert und identifiziert werden. Die Rückverfolgung von Paletten ist jederzeit möglich, da diese mit allen Objekten im Prozess kommunizieren und ihre Wege durch die Produktion selbständig finden.	Kategorie	5	TRG	2
		Abkürzung	IP		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Intelligente Personaleinsatzplanung	Kurzfristige Änderungen in der Fertigung durch Änderungen im Produktionsprogramm (z. B. auf Grund von Kundenwünschen, Störungen in der Produktion etc.) werden automatisch erfasst und es wird selbständig die Verfügbarkeit der Mitarbeiter geprüft. Anschließend wird ein neuer Personalplan automatisch erstellt und die betroffenen Mitarbeiter werden selbständig benachrichtigt.	Kategorie	6	TRG	2
		Abkürzung	IPEP		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Intelligente Produktionssteuerung und Lagerhaltung	Es werden alle in der Produktion eingelasteten Werkstücke bedarfsgerecht dargestellt (mit Größe und aktuellem Standort). Der Versand und die Produktionssteuerung können zu jedem beliebigen Zeitpunkt die aktuelle Situation in der Produktionslinie einsehen und gegebenenfalls eingreifen, um beispielsweise ein einzelnes Werkstück, das für die Finalisierung eines Kundenauftrags noch fehlt, priorisiert zu bearbeiten. In dem Fall der Auftragspriorisierung richtet sich die Produktion automatisch darauf aus. Diese Daten liefern die grundlegende Basis für die Detailplanung des Versands und die Synchronisation mit dem Lieferdatum. Die Lagerhaltung kann so minimiert und der vorhandene Lagerplatz besser genutzt werden.	Kategorie	5	TRG	2
		Abkürzung	IPSL		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					



**Methodensteckbriefe 11/16**

Beschreibung		Bewertung			
Intelligente Routen durch Vernetzung	Heutige Systeme versorgen Stationen in der Produktion meist nach einem festen Plan mit Ware und führen ebenfalls einfache Nachbestellungen aus. Intelligente Routen sind ein dynamisches Verfahren, das eine gesamtheitliche Versorgung aller Stationen auf Grundlage von Echtzeitdaten und deren Auswertung durch eine Künstliche Intelligenz optimiert erstellt.	Kategorie	5	TRG	2
		Abkürzung	IRV		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Intelligente standortübergreifende Transportprozesse	Hiermit wird die Überwachung von Behältern bzw. deren Inhalten während des (standortübergreifenden) Transports bezeichnet. Dabei sorgt der Einsatz eingebetteter Systeme in Transportboxen für eine permanente Verknüpfung von Informations- und Materialflüssen. Bei Problemen wird automatisch gehandelt und Eskalationsprozesse werden eingeleitet.	Kategorie	5	TRG	2
		Abkürzung	ISTP		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Intelligente Werkstücke	Individuelle Produkte werden immer mehr gefordert. Um dies schnell und einfach umzusetzen, werden am Werkstück, das durch die Montagelinie läuft und nach und nach zusammengebaut wird, alle relevanten Informationen (z. B. mit Hilfe von QR-Codes, RFID) bereitgestellt. Dadurch können alle produktionsrelevanten Informationen im weiteren Herstellungsprozess abgerufen werden. Die Daten werden an jeder Arbeitsstation ausgelesen. Anschließend erscheinen detaillierte Montagehinweise auf dem Bildschirm des entsprechenden Arbeitsplatzes. Am Ende der Montagelinie wird das vollständig funktionsfähige Produkt über einen Scan des QR-Codes als fertig montiert und geprüft im System verbucht. Das intelligente Werkstück kommuniziert automatisch mit den Beteiligten der Produktion, sodass es zu keinen Verzögerungen kommt und reagiert selbständig auf geänderte Wünsche bspw. durch den Kunden.	Kategorie	6	TRG	2
		Abkürzung	IW		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Live-Wertstromanalyse	Der Wertstrom im Unternehmen kann durch Sensorik und eine Softwarelösung schnell und einfach aufgenommen werden. Darauf aufbauendes Wertstromdesign kann durch die Software einfach dargestellt werden. Aufgrund von Echtzeitauswertungen und Big Data Analysen wird eine optimale Wertstromanalyse zeitgenau dargestellt.	Kategorie	5	TRG	1
		Abkürzung	LWA		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					

**Methodensteckbriefe 12/16**

Beschreibung		Bewertung			
Lokalisierung und Tracking von Ressourcen	Der erste Schritt, um eine digitale Nachverfolgung aller Ressourcen in Echtzeit zu etablieren, ist das Ausstatten der Ressourcen mit Kennungen. Diese digitalen Kennungen ermöglichen eine eindeutige Auskunft, um welche Ressource es sich handelt. In den folgenden Schritten können diese Informationen verarbeitet und grafisch ausgegeben werden. Die Methode kann bspw. eingesetzt werden, um zu jedem Zeitpunkt den aktuellen Standort eines Artikels, eines Werkzeugs oder Ähnlichem zu bestimmen. Bestandszahlen lassen sich so automatisch korrigieren und es wird verhindert, dass Produkte oder Werkzeuge gesucht werden müssen oder verloren gehen.	Kategorie	5	TRG	2
		Abkürzung	LTR		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Objektidentifikation	Die Methode Objektidentifikation beschreibt den Vorgang der eindeutigen und automatischen Identifikation von Ladungsträgern, Werkstückträgern, Maschinen, Produkten, etc. im Rahmen eines Herstellungs- bzw. Logistikprozesses. Dazu können verschiedene Technologien, wie zum Beispiel RFID oder QR-Codes, genutzt werden. Durch die Kennung werden durchweg digitale Daten erzeugt, die in Echtzeit zur Verfügung stehen.	Kategorie	1	TRG	3
		Abkürzung	OID		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Papierlose Fertigung	Die Papierlose Fertigung bezeichnet die Bereitstellung aller arbeitsrelevanten Dokumente und Daten in digitaler Form, auf Bildschirmen oder mobilen Endgeräten am Arbeitsplatz. Mit der Abschaffung von papierbezogenen Informationen existiert nur noch eine relevante, zentrale Datenquelle (Single Source of Truth). Diese garantiert die Aktualität von Maschinen- und Prozessdaten und ermöglicht ein digitales Abbild der Fertigung. Dabei wird die Echtzeitfähigkeit vorausgesetzt und einheitliche Datenformate sind gegeben.	Kategorie	4	TRG	3
		Abkürzung	PF		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Predictive Maintenance	Predictive Maintenance beschreibt die vorausschauende Instandhaltung von Maschinen und deren Komponenten. Dabei kann auf Basis von Datenanalysen und Simulationen ein optimaler Wartungszeitpunkt oder der Teileverschleiß bestimmt werden, bevor es zu einem Systemausfall kommt. Reparaturen können datenbasiert geplant, die benötigten Ersatzteile bestellt und Techniker automatisch angefordert werden.	Kategorie	5	TRG	3
		Abkürzung	PM		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					

**Methodensteckbriefe 13/16**

Beschreibung		Bewertung	
Produktionsdaten per mobiler App	Viele Produktionsmaschinen erheben eine große Anzahl von Daten zur internen Steuerung. Jedoch werden die meisten Daten nur maschinenintern verarbeitet und sind nicht extern abrufbar. Diese Maschineninformationen werden nun auf mobilen Endgeräten bereitgestellt. Als Hardware dienen handelsübliche Smartphones oder Tablets. Daneben können auch Daten aus der Produktion auf den mobilen Endgeräten ausgegeben und angesprochen werden.	Kategorie	4 TRG 3
		Abkürzung	PDMA
		Kosten	Zeit
		Qualität	Mitarbeiter
		Flexibilität	
Aufwand			
Selbstkonfigurierung von Produktionsanlagen	Um stetig wechselnde Produkte fertigen zu können, müssen die Maschinen umgerüstet werden. Das Konfigurieren und Einstellen der Maschinen bedeutet erheblichen Aufwand. Um diesen Aufwand zu minimieren, benötigt es übergreifende Automatisierungskomponenten, die eine intelligente Selbstkonfiguration ermöglichen.	Kategorie	6 TRG 2
		Abkürzung	SKFP
		Kosten	Zeit
		Qualität	Mitarbeiter
		Flexibilität	
Aufwand			
Selbstkorrektur von Produktionsanlagen	Maschinen / das CPS erkennen die Abweichungen vom Soll-Zustand einer Produktionsanlage durch spezielle Messinstrumente und eine intelligente Software eigenständig. Dies vermeidet eine aufwendige manuelle Nachjustierung der Produktionsanlagen und eine Nachbearbeitung von mangelhaften Produkten.	Kategorie	6 TRG 2
		Abkürzung	SKRP
		Kosten	Zeit
		Qualität	Mitarbeiter
		Flexibilität	
Aufwand			
Selbstorganisierte Produktion	Die selbstorganisierte Produktion nutzt verschiedene Basistechnologien der Industrie 4.0. Diese werden verknüpft, um eine Selbstorganisation und -steuerung der Produktion zu ermöglichen. Die einzelnen Produktionsanlagen organisieren sich also autonom auf Basis der ihnen zur Verfügung stehenden Informationen zur Auftragslage und Auslastung der übrigen Maschinen. Das System kann so optimal auf kurzfristige Änderungen von Kunden reagieren und Stillstände vermeiden.	Kategorie	6 TRG 1
		Abkürzung	SOP
		Kosten	Zeit
		Qualität	Mitarbeiter
		Flexibilität	
Aufwand			

**Methodensteckbriefe 14/16**

Beschreibung		Bewertung			
Simulation mit virtuellen Prototypen/ Prozessen	Durch die Simulation aller relevanten Komponenten des Produktionsumfeldes/ Prozesses kann bereits in der Entwicklungsphase das Systemverhalten getestet werden. Genauso gilt dies auch für bestehende Prozesse, sodass eine Optimierung vorgenommen werden kann.	Kategorie	5	TRG	2
		Abkürzung	SVP		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Verfügbarkeit digitaler Produktionsdaten	In der Produktion werden durch verschiedene Methoden eine große Menge an Daten in digitaler Form erhoben (z. B. Qualitätsdaten, Prozessdaten, Auftragsdaten, Bestands- und Lagerdaten). Diese Daten können auf unterschiedliche Weise z. B. für das Qualitätsmanagement ausgewertet werden. Durch das digitale Erfassen der Daten ist die Verfügbarkeit gewährleistet und Medienbrüche werden vermieden.	Kategorie	2	TRG	3
		Abkürzung	VDPD		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Verfügbarkeit von Echtzeitdaten	Durch den Einsatz von Echtzeitsensoren können z. B. Zustandsdaten von Maschinen oder Daten zur Anlieferung von Teilen an die übergreifende IT-Struktur weitergegeben werden. Digitale Daten sind in Echtzeit verfügbar. Darauf aufbauend können z. B. echtzeitdatenbasierte Kennzahlen ermittelt werden, die in Shopfloor-Boards oder in ein mobiles Reporting integriert werden können.	Kategorie	2	TRG	3
		Abkürzung	VED		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					
Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen/ Werkzeugen	Der Produktionsanlauf bei neuen Fertigungslinien birgt hohe Risiken, da trotz sorgfältiger Planung immer wieder unvorhergesehene Schwachstellen zu Tage treten. Um diese frühzeitig zu erkennen und somit die Time-to-Market des Produktes zu reduzieren, wird auf die virtuelle Inbetriebnahme von Maschinen und Werkzeugen zurückgegriffen.	Kategorie	4	TRG	2
		Abkürzung	VIPA		
		Kosten		Zeit	
		Qualität		Mitarbeiter	
		Flexibilität			
Aufwand					

**Methodensteckbriefe 15/16**

Beschreibung		Bewertung	
<b>Virtuelles Abbild der Produktion</b>	Die reale Fabrik wird vollständig auf digitaler Ebene abgebildet. Somit entsteht ein virtuelles Abbild der Produktion, welches nicht nur alle Maschinen in einem 3D-Modell visualisiert, sondern auch die Abläufe und die Zustände der Systemelemente während der Fertigung darstellt. Sensoren bilden hierfür die Grundlage, indem sie den Status der einzelnen Arbeitsplätze und Maschinen in Echtzeit an das "virtuelle Abbild" weitergeben. Produktionsprozesse lassen sich somit transparent überwachen und steuern.	<b>Kategorie</b> 5	<b>TRG</b> 2
		<b>Abkürzung</b> VAP	
		<b>Kosten</b>	<b>Zeit</b>
		<b>Qualität</b>	<b>Mitarbeiter</b>
		<b>Flexibilität</b>	
<b>Aufwand</b>			
<b>Visuelle In-Process-QS</b>	Aufbau einer prozesssicheren, optischen In-Process-Qualitätssicherung mittels Integration einer Smart Camera in Fertigungsanlagen oder Montagestationen. Dadurch kann auf Qualitätsabweichungen aufmerksam gemacht und sofort gehandelt werden.	<b>Kategorie</b> 4	<b>TRG</b> 3
		<b>Abkürzung</b> VPQS	
		<b>Kosten</b>	<b>Zeit</b>
		<b>Qualität</b>	<b>Mitarbeiter</b>
		<b>Flexibilität</b>	
<b>Aufwand</b>			
<b>Zentrale Rechenleistung</b>	Im Zuge der Vernetzung der Produktion über cyber-physische Systeme werden große Datenmengen erfasst, gespeichert, verarbeitet und ausgewertet. Die an den Maschinen und Anlagen dezentral verteilten Recheneinheiten können die dafür erforderliche Kapazität nicht mehr aufbringen, weswegen die Rechenleistung zentral zur Verfügung gestellt werden muss (Single Source of Truth). Dies kann über Cloud-Computing-Lösungen erfolgen.	<b>Kategorie</b> 2	<b>TRG</b> 3
		<b>Abkürzung</b> ZRL	
		<b>Kosten</b>	<b>Zeit</b>
		<b>Qualität</b>	<b>Mitarbeiter</b>
		<b>Flexibilität</b>	
<b>Aufwand</b>			
<b>Zentrale Verfügbarkeit bzw. Verwaltung von Daten</b>	Die zentrale Verfügbarkeit bzw. Verwaltung von Daten bildet die Grundlage für eine einheitliche, unternehmensübergreifende Übersicht und Kontrolle. Standort- und gewerkeübergreifend werden Daten in einer zentralen Datenquelle zusammengeführt, auf die unternehmensweiter Zugriff ermöglicht werden kann. Dies kann beispielsweise über Cloud-Computing-Lösungen erfolgen. Aufbauend darauf können dann z. B. Analyse- und Visualisierungsmethoden die Daten aggregieren und aufbereiten.	<b>Kategorie</b> 2	<b>TRG</b> 3
		<b>Abkürzung</b> ZVD	
		<b>Kosten</b>	<b>Zeit</b>
		<b>Qualität</b>	<b>Mitarbeiter</b>
		<b>Flexibilität</b>	
<b>Aufwand</b>			

## Methodensteckbriefe 16/16

Beschreibung		Bewertung			
Zukunftsfähige Kommunikationsnetzwerke	Durch den flächendeckenden Einsatz von CPS wird generell eine Infrastruktur benötigt, die einen wesentlich höheren und qualitativ hochwertigeren Datenaustausch ermöglicht, als dies existierende Kommunikationsnetze können. Eine grundlegende Voraussetzung für Industrie 4.0 ist deshalb der Ausbau der bestehenden Kommunikationsnetze bezüglich garantierter Latenzzeiten, ihrer Ausfallsicherheit, ihrer Qualität (Quality of Services) und mit einer flächendeckend zur Verfügung stehenden Bandbreite (z. B. 5G).	Kategorie	1	TRG	2
		Abkürzung	ZKN		
		Kosten	<input type="radio"/>	Zeit	<input checked="" type="radio"/>
		Qualität	<input type="radio"/>	Mitarbeiter	<input type="radio"/>
		Flexibilität	<input type="radio"/>		
		Aufwand	<input checked="" type="radio"/>		

## Anhang C: Methodenbeziehungen

Interdependenzmatrix 1/2

Methode	AV	AUW	APOP	ATF	BIF	BVPA	CM	CSD	DSAS	DDK	DFPA	DKZM	DLDF	DSDM	DVMZ	DWI	DSM	DPEP	DITS	EF	ESIN	ECS	EKP	EPD	EDAI	EDAA	EDWI	FLPS	FDP	HKP		
AV																																
AUW								U			U				U	U				U										U		
APOP																																
ATF																																
BIF	U																															
BVPA																V	V															
CM																																
CSD												V	V													V	V	V				
DSAS																										V	V	V				
DDK																																
DFPA																																
DKZM																																
DLDF																																
DSDM																																
DVMZ																																
DWI																																
DSM																																
DPEP	U																	U														
DITS																																
EF																																
ESIN																																
ECS																																
EKP																																
EPD																																
EDAI																																
EDAA																																
EDWI																																
FLPS																																
FDP																																
HKP																																
IPA																																
IAEP																																
IAUD																																
IB																																
IDE																																
IKMM																																
IP																																
IPEP																																
IPSL																																
IRV																																
ISTP																																
IW																																
LWA																																
LTR	U																															
OID																																
PF	V																															
PM																																
PDMA																																
SKFP																																
SKRP																																
SOP																																
SVP																																
VDPD																																
VED	V																															
VIPA																																
VAP																																
VPQS																																
ZRL																																
ZVD	V																															
ZKN																																

**Legende:**  
 Voraussetzende Beziehung – V | Unterstützende Beziehung – U | Abkürzungen zu Methoden siehe Abbildung 4-4

**Interdependenzmatrix 2/2**

Methode	IPA	IAEP	IAUD	IB	IDE	IKMM	IP	IPEP	IPSL	IRV	ISTP	IW	LWA	LTR	OID	PF	PM	PDMA	SKFP	SKRP	SOP	SVP	VDPD	VED	VIPA	VAP	VPQS	ZRL	ZVD	ZKN
AV																														
AUW																														
APOP																														
ATF																														
BIF																														
BVPA																														
CM																														
CSD																														
DSAS																														
DDK																														
DFPA																														
DKZM																														
DLDF																														
DSDM																														
DVMZ																														
DWI																														
DSM																														
DPEP																														
DITS																														
EF																														
ESIN																														
ECS																														
EKP																														
EPD																														
EDAI																														
EDAA																														
EDWI																														
FLPS																														
FDP																														
HKP																														
IPA																														
IAEP																														
IAUD																														
IB																														
IDE																														
IKMM																														
IP																														
IPEP																														
IPSL																														
IRV																														
ISTP																														
IW																														
LWA																														
LTR																														
OID																														
PF																														
PM																														
PDMA																														
SKFP																														
SKRP																														
SOP																														
SVP																														
VDPD																														
VED																														
VIPA																														
VAP																														
VPQS																														
ZRL																														
ZVD																														
ZKN																														

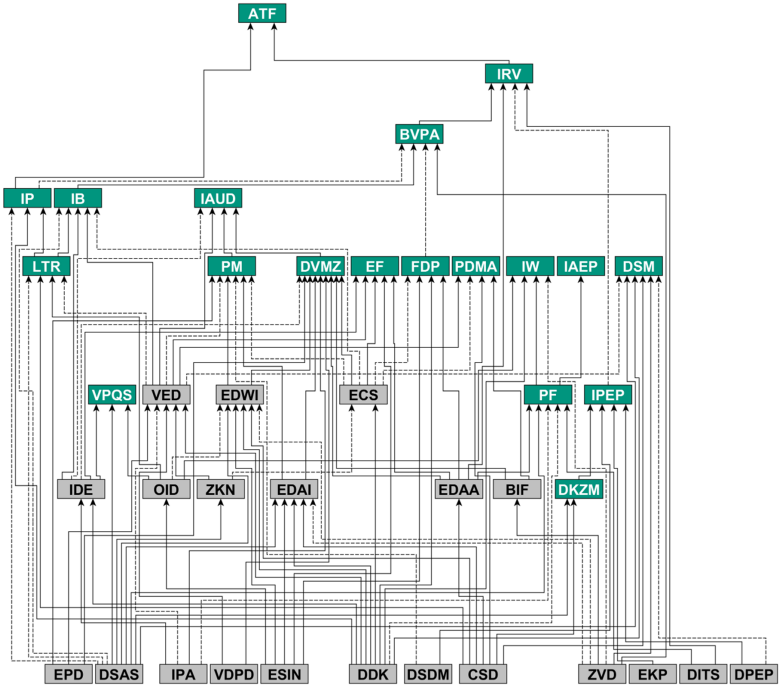
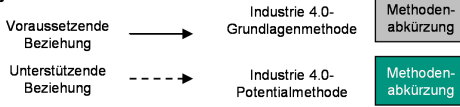
**Legende:**  
 Voraussetzende Beziehung – V | Unterstützende Beziehung – U | Abkürzungen zu Methoden siehe Abbildung 4-4



## Anhang D: Methodennetze – Produktionstypologien

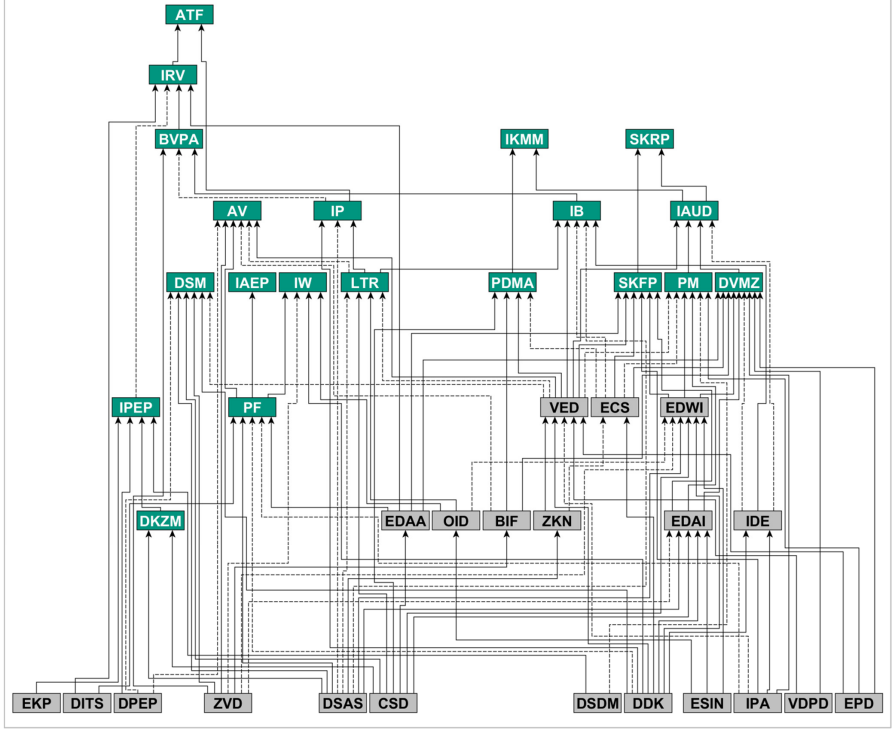
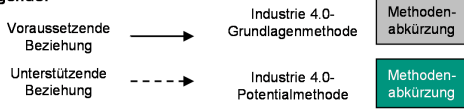
### Methodennetz Fokus auf Stückzahl bei manueller Produktion

Legende:



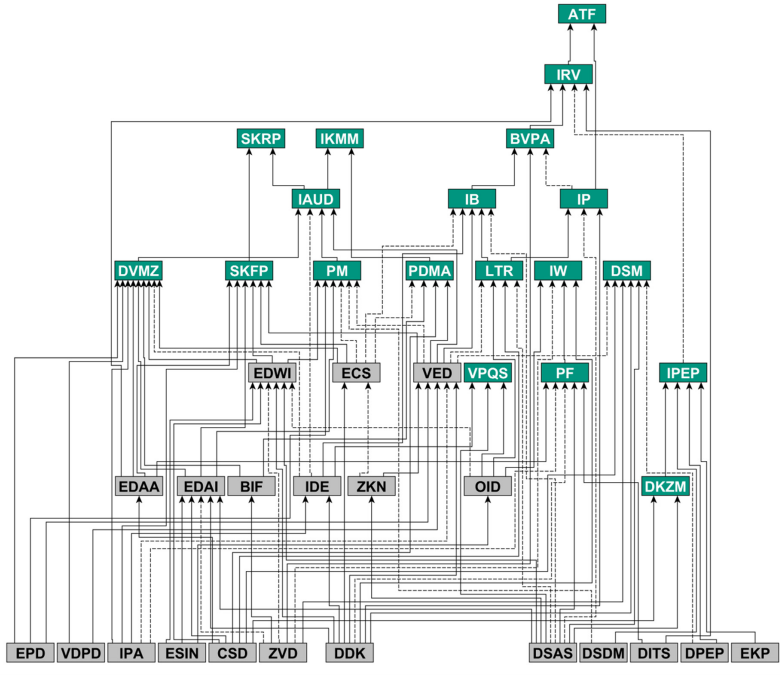
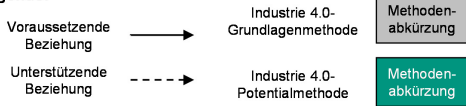
### Methodennetz Fokus auf Variantenzahl bei automatisierter Produktion

**Legende:**



### Methodennetz Fokus auf Stückzahl bei automatisierter Produktion

**Legende:**



## Anhang E: Kriterienkatalog

### Strategischer Kriterienkatalog 1/4

Kriterium	Beschreibung	Quelle(n)	
Kosten	Betriebsmittelproduktivität	Produktivität von Betriebsmitteln (Anlagen, Maschinen, langlebigen Werkzeugen, etc.); Berechnung erfolgt durch den Quotienten von Produktionsergebnis (Output) und Betriebsmitteleinsatz.	Gottmann (2016, S. 55) Westkämper (2006, S. 65f.) Zangemeister (2000, S. 215)
	Personalproduktivität	Produktivität des Produktionspersonals; Berechnung erfolgt durch den Quotienten von Produktionsergebnis (Output) und Personaleinsatz (Arbeitsstunden oder -kosten).	Gottmann (2016, S. 105) Westkämper (2006, S. 60) Zangemeister (2000, S. 215)
	Maschinenauslastung	Verhältnis von mittlerer erbrachter Leistung zu maximal möglicher Leistung von Maschinen bzw. Anlagen.	Gottmann (2016, S. 55) Zangemeister (2000, S. 215)
	Personalauslastung	Verhältnis von mittlerer erbrachter Leistung zu maximal möglicher Leistung des Personals.	Gottmann (2016, S. 105)
	Automatisierungsgrad	Verhältnis von automatisierten Produktionsschritten zur Gesamtzahl an Produktionsschritten.	Gottmann (2016, S. 56)
	Informationsfluss	Qualität der Kommunikation innerhalb der Produktion; Bewertung unter Berücksichtigung von Verfügbarkeit, Umfang und Geschwindigkeit der Bereitstellung von Informationen.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 92) Brieke (2009, S. 163f.)
	Datenanalyse	Möglichkeit und Qualität der Auswertung von gesammelten Produktionsdaten zur Erkennung von Mustern in der Vergangenheit, Ableitung von Prognosen oder Analyse möglicher Szenarien.	Wieland & Pfitzner (2014, S. 80ff.)
	Effizienz der Steuerung	Reaktionsfähigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit der Produktionssteuerung bei Eintritt unvorhergesehener Ereignisse. (Steigerung von Effizienz der Produktionssteuerung durch computergestützte Steuerungsverfahren möglich).	Gottmann (2016, S. 71) Schuh & Stich (2014, S. 19ff.)
	Effizienz der Planung	Planungsfähigkeit der Produktion und des dazugehörigen Produktionsprogramms; kritisch z. B. bei hoher Variantenvielfalt zur Minimierung von Rüst- und Durchlaufzeiten und Realisierung einer effizienten Produktion.	Gottmann (2016, S. 71)
Zeit	Durchlaufzeit	Zeitspanne zwischen dem Beginn des ersten Arbeitsvorgangs eines Produkts bis zum Ende des letzten Arbeitsvorgangs; d.h. Summe aus Bearbeitungs-, Transport- und Wartezeiten.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 92) Brieke (2009, S. 159)
	Rüstzeit	Zeit, die erforderlich ist, um die Produktionsanlage auf einen Auftrag vorzubereiten und ggf. Zeit, die erforderlich ist, um die Anlage nach Erledigung des Auftrags in den ursprünglichen Zustand zurückzusetzen.	Gottmann (2016, S. 98) Schulze & Brieke et al. (2012, S. 92)
	Anlaufzeit	Notwendige Zeitspanne bis zum Erreichen der geplanten Produktionsstückzahl (Anlaufzeit des Produktionssystems).	Brieke (2009, S. 160ff.)

## Strategischer Kriterienkatalog 2/4

Kriterium	Beschreibung	Quelle(n)	
Zeit	Time-to-Market	Zeit von der Ideenentwicklung neuer Technologien oder Innovationen in Produkten oder der Produktion bis zur tatsächlichen Umsetzung; Wettbewerbsvergleichskriterium hinsichtlich der Reaktionszeit auf Kundenwünsche.	Roth (2016, S. 7) Schulze & Brieke et al. (2012, S. 92) Westkämper (2006, S. 70)
	Lieferzeit	Benötigte Zeit von der Kundenbestellung bis zur Auslieferung des Produkts (Auftragserfassungsdatum bis Auslieferdatum).	Gottmann (2016, S. 121)
	Termintreue	Einhaltung von zugesagten Lieferterminen; Bewertung zum Zeitpunkt der Lieferung.	Gottmann (2016, S. 127) Schulze & Brieke et al. (2012, S. 92)
Qualität	Ausschuss & Nacharbeit	Anteil an Fehlprodukten am Gesamtoutput; Summe aus Fehlprodukten mit Bedarf an Nacharbeit und Ausschuss.	Gottmann (2016, S. 62f.) Brieke (2009, S. 182ff.) Zangemeister (2000, S. 215)
	Prozessfähigkeit	Eignung eines Produktionsprozesses, den geforderten Qualitätsansprüchen an das produzierte Produkt gerecht zu werden. (Bewertet wird, mit welcher Sicherheit der Prozess Teile produziert, die innerhalb der geforderten Spezifikationen liegen; Aussagen über die Prozessfähigkeit sind nur bei stabilen Prozessen möglich).	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 93) Brieke (2009, S. 182ff.)
	Prozess-zuverlässigkeit	Verlässlichkeit von Produktionsanlagen, die ihr zugewiesenen Funktionen in einem Zeitintervall zu erfüllen; Bewertung unter Berücksichtigung von Störungshäufigkeit und Störungsauswirkungen.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 93) Brieke (2009, S. 185)
	Datensicherheit	Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz der Produktionsdaten vor Zugriff durch Unbefugte.	Fischer (2016, S. 51ff.)
	Einhaltung von Standards	Einhaltung von freiwilligen Standards, wie beispielsweise der Standards des Ganzheitlichen Produktionssystems oder der Hygiene und Sauberkeit.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 91f.) Brieke (2009, S. 152ff.)
	Transparenz der Prozesse und Materialflüsse	Übersichtlichkeit und Verständlichkeit der Transporte und ablaufenden Prozesse in der Produktion.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 93) Brieke (2009, S. 192)
	Transparenz der Bestände	Notwendiger Aufwand zur Feststellung der Bestandshöhe in einem oder mehreren Prozessschritten.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 93) Brieke (2009, S. 191f.)
Mitarbeiter	Ergonomie	Belastungen der Mitarbeiter durch Arbeitsbedingungen und Arbeitsablauf; Bewertung unter Berücksichtigung der erforderlichen Muskelkräfte, der Körperhaltung sowie des zur Verfügung stehenden Bewegungsraums.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 92) Brieke (2009, S. 165ff.) Zangemeister (2000, S. 216)
	Arbeitssicherheit	Beherrschung und Minimierung von Gefahren für die Sicherheit und Gesundheit der Produktionsmitarbeiter.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 91f.) Zangemeister (2000, S. 216)
	Arbeitsqualität	Arbeitsinhalt im Sinne von Tätigkeitsvielfalt und -umfang, Anforderungen an die Mitarbeiter bzgl. IT-Fähigkeiten sowie Bedienfreundlichkeit der Mensch-Maschine Interaktion.	Brieke (2009, S. 167) Zangemeister (2000, S. 216)
	Qualifizierung	Unterstützung und Möglichkeiten des Anlernens neuer Produktionsmitarbeiter sowie der Weiterqualifizierung bestehender Mitarbeiter.	Gottmann (2016, S. 59) Brieke (2009, S. 172f.)

### Monetärer Kriterienkatalog 3/4

Kriterium	Beschreibung	Quelle(n)	
Einmalige Einnahmen	Veräußerungserlöse <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grundstücke, Gebäude</li> <li>▪ Anlagen, Maschinen</li> <li>▪ Sonstiges</li> </ul>	Einnahmen, die durch den Verkauf von Vermögenswerten anfallen. Dazu zählen neben Grundstücken und Gebäuden auch Maschinen und Anlagen sowie anderweitige Vermögensgegenstände.	Zangemeister (2000, S. 218)
	Bestandsminderungen <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material</li> <li>▪ Halb- und Fertigfabrikate</li> </ul>	Freiwerdung von Kapital durch die Reduzierung der Bestände, bedingt durch die Umstellung von Prozessen. Reduzierung sowohl in den Beständen der Halb- und Fertigfabrikate sowie dem Produktionsmaterial.	Zangemeister (2000, S. 218)
	Öffentliche Fördermittel	Investitionszusagen von staatlicher Seite.	Seiter & Bayrle et al. (2016, S. 47) Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150)
	Sonstige einmalige Einnahmen		
Periodische Ausgaben	Personalkosten-erhöhung <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fertigungs-personal</li> <li>▪ Logistik-personal</li> <li>▪ Gemeinkosten-löhne</li> <li>▪ Lohnnebenkosten</li> </ul>	Personalzahlungen in der direkten Produktion und Zahlungen für Personal, das nicht direkt an der Wertschöpfung beteiligt ist. Neben den Löhnen für Fertigungs- und Logistikpersonal sind auch Gemeinkostenlöhne und Lohnnebenkosten zu beachten.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150) Zangemeister (2000, S. 219)
	Miete	Mietzahlungen für Fläche oder Raum der Fabrik.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150) Zangemeister (2000, S. 219)
	Entsorgung von Abfällen und Abgaben für Emissionen	Produktions- und sonstige Abfälle müssen entsorgt werden. Hierfür fallen Zahlungen an. Für bestimmte Emissionen sind Abgaben zu entrichten.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150)
	Kosten für Wartung, Pflege, etc.	Kosten für den Erhalt der Einsatzfähigkeit und des Wertes der Vermögenswerte.	Zangemeister (2000, S. 219)
	Dienstleistungen Dritter und interner Stellen	Interne und externe Dienstleistungen, die durch die Fabrik in Anspruch genommen werden und dadurch laufende Zahlungen verursachen.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150)
	Lizenzgebühren	Zahlungen für benötigte Lizenzen, um gewisse Technologien ausführen zu können.	Seiter & Bayrle et al. (2016, S. 49)
	Materialkosten-erhöhung <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Werkstoffkosten</li> <li>▪ Hilfs- und Betriebskosten</li> <li>▪ Energiekosten</li> </ul>	Materialkostenerhöhungen, die sich durch Umstellung des Prozesses oder der Produktion ergeben. Zu den Materialkosten können Werkstoff- sowie Hilfs- und Betriebsmittelkosten und Energiekosten gehören.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150) Zangemeister (2000, S. 219)

**Strategischer Kriterienkatalog 4/4**

Kriterium	Beschreibung	Quelle(n)	
Flexibilität	Modularität	Strukturierung eines Produktionssystems in unabhängige, kleinere, teilautonome Subsysteme; Bewertung, in wie weit das Produktionssystem modular strukturiert ist. Bei den Subsystemen handelt es sich um standardisierte Einheiten und Elemente. Ein modularer Aufbau bietet das Potential der Komplexitätsreduzierung.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 94) Heger (2007, S. 24)
	Kompatibilität	Vernetzungsfähigkeit (eines Objekts) bezüglich Material-, Informations-, und Medienflüssen (sowie dem Menschen). Entscheidend ist eine passende Schnittstellengestaltung, z. B. in Form einheitlicher Softwareschnittstellen.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 94) Heger (2007, S. 24)
	Weiterentwicklungspotential	Potential zur Weiterentwicklung (Verbesserungen und Erweiterungen) von Methoden oder Technologien sowie die Offenheit für neue Technologien.	Pelzer (1999, S. 58)
	Weiterentwicklungs-Know-how	Umfang des im Unternehmen bestehenden Know-hows zur Weiterentwicklung von Technologien oder Methoden.	Pelzer (1999, S. 61)

**Monetärer Kriterienkatalog 1/4**

Kriterium	Beschreibung	Quelle(n)	
Einmalige Ausgaben (Planung und Realisierung)	Externes Planungspersonal	Zahlungen, die durch Mitwirkung externer Firmen im Rahmen der Einführung von Industrie 4.0-Methoden entstehen.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 96) Brieke (2009, S. 147) Zangemeister (2000, S. 218)
	Internes Planungspersonal	Zahlungen für internes Planungspersonal, z. B. wenn interne Personalkapazitäten für neue Projekte gebunden werden.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 96) Brieke (2009, S. 147) Zangemeister (2000, S. 218)
	Reisekosten	Zahlungen für Reisen fallen an, wenn externe Firmen beauftragt sind und diese Reisekosten separat abrechnen oder wenn eigene Mitarbeiter reisen.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 96) Brieke (2009, S. 147)
	Sachmittel	Zahlungen für alle Verbrauchsmittel, die im Rahmen des Industrie 4.0-Projekts verwendet werden.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 96) Brieke (2009, S. 147)
	Personalaufwand: ▪ Personalbeschaffung ▪ Schulungen/ Weiterbildungen ▪ Personalfreisetzung	Falls im Rahmen des Projektes Personal freigesetzt oder zusätzlich angestellt werden muss, müssen mglw. Ausgaben für Abfindungen oder Personalbeschaffung beachtet werden, außerdem müssen Kosten für Schulungen der Mitarbeiter berücksichtigt werden.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 97) Brieke (2009, S. 149) Zangemeister (2000, S. 218)
	Anlaufaufwand ▪ Personal ▪ Material/ ▪ Ausschuss ▪ Störungen	Während des Anlaufs neuer Industrie 4.0-Technologien kommt es zu erhöhten Zahlungen im Vergleich zum laufenden Betrieb. Es ist während des Anlaufs mit erhöhtem Personalaufwand zu rechnen, außerdem kann es zu höherem Ausschuss und Nacharbeit durch noch nicht erlernte Prozesse kommen.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 97, S. 149) Zangemeister (2000, S. 218)
	Anpassung von Softwaresystemen	Zahlungen für die Integration neuer Funktionen und Anpassungen, um neuen Anforderungen gerecht zu werden.	Ernst & Schmidt et al. (2016, S. 753) Teich & Kolbenschlag et al. (2008, S. 44ff.)
	Installation/ Anbindung	Zahlungen für notwendige Installationen neuer Systeme oder Technologien.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 98)
	Umzug/ Umstellung	Kosten für den Umzug bzw. die Umstellung der Produktionsmittel und Arbeitsplätze.	Brieke (2009, S. 149) Zangemeister (2000, S. 218)
	Genehmigungen	Für Genehmigungen bei staatlichen Stellen müssen Gebühren entrichtet werden.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 96) Brieke (2009, S. 147)
	Abnahmen	Staatliche oder sonstige Abnahmen.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 97) Brieke (2009, S. 149)
Entgangener Deckungskostenbeitrag	Es kann zu projektspezifischen Lieferschwierigkeiten oder Kapazitätsengpässen kommen, die Aufträge für das Unternehmen obsolet werden lassen.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 97)	



**Monetärer Kriterienkatalog 2/4**

Kriterium	Beschreibung	Quelle(n)	
Einmalige Ausgaben (Anlagevermögen)	Grundstücke	Zahlungen für den Erwerb und Freimachung, Zahlungen für die Herrichtung und öffentliche Erschließung des Grundstücks.	Schulze & Brieké et al. (2012, S. 98) Brieké (2009, S. 148) Zangemeister (2000, S. 218)
	Gebäude	Zahlungen für das Gebäude ohne technische Ausrüstung.	Schulze & Brieké et al. (2012, S. 98) Brieké (2009, S. 148) Zangemeister (2000, S. 218)
	Maschinen und Anlagen	Zahlungen für den Erwerb von Maschinen und Anlagen.	Schulze & Brieké et al. (2012, S. 98) Zangemeister (2000, S. 218)
	Werkzeuge	Zahlungen für den Erwerb von Werkzeugen.	Zangemeister (2000, S. 218)
	Prüfeinrichtungen	Zahlungen für den Erwerb notwendiger Prüfeinrichtungen.	Zangemeister (2000, S. 218)
	Lager-einrichtungen	Zahlungen für den Erwerb notwendiger Lagereinrichtungen.	Zangemeister (2000, S. 218)
	Transport-einrichtungen	Zahlungen für den Erwerb notwendiger Transporteinrichtungen.	Zangemeister (2000, S. 218)
	Arbeitsplatz-ausstattung	Umfasst die generelle Ausstattung von Arbeitsplätzen.	Zangemeister (2000, S. 218)
	Hardware/Software	Zahlungen für den Erwerb notwendiger Informations- und Kommunikationstechnologie.	Pfeffer (2014)
	Adaption der Arbeitsumgebung:	Ausgaben für Ausrüstung der Gebäude zur Beleuchtung, Klimatisierung, Lärmdämmung und zur allgemeinen Raumgestaltung.	Zangemeister (2000, S. 218)
	▪ Beleuchtung		
	▪ Klimatisierung		
	▪ Lärmdämmung		
	▪ Allgemeine Raumgestaltung		
Eigener Herstellungsaufwand:	Interne Aufwendungen für selbst durchgeführte Baumaßnahmen und die Herstellung von Werkzeugen und Vorrichtungen.	Zangemeister (2000, S. 218)	
▪ Baumaßnahmen			
▪ Werkzeuge			
▪ Vorrichtungen			
▪ Sonstiges			
Anpassung technischer Einrichtungen	Zahlungen für technische Einrichtungen, die sich durch technische Anpassungen ergeben.	Zangemeister (2000, S. 218)	
Anpassung sozialer Einrichtungen	Zahlungen für soziale Einrichtungen, die sich durch technische Anpassungen ergeben.	Zangemeister (2000, S. 218)	

### Monetärer Kriterienkatalog 3/4

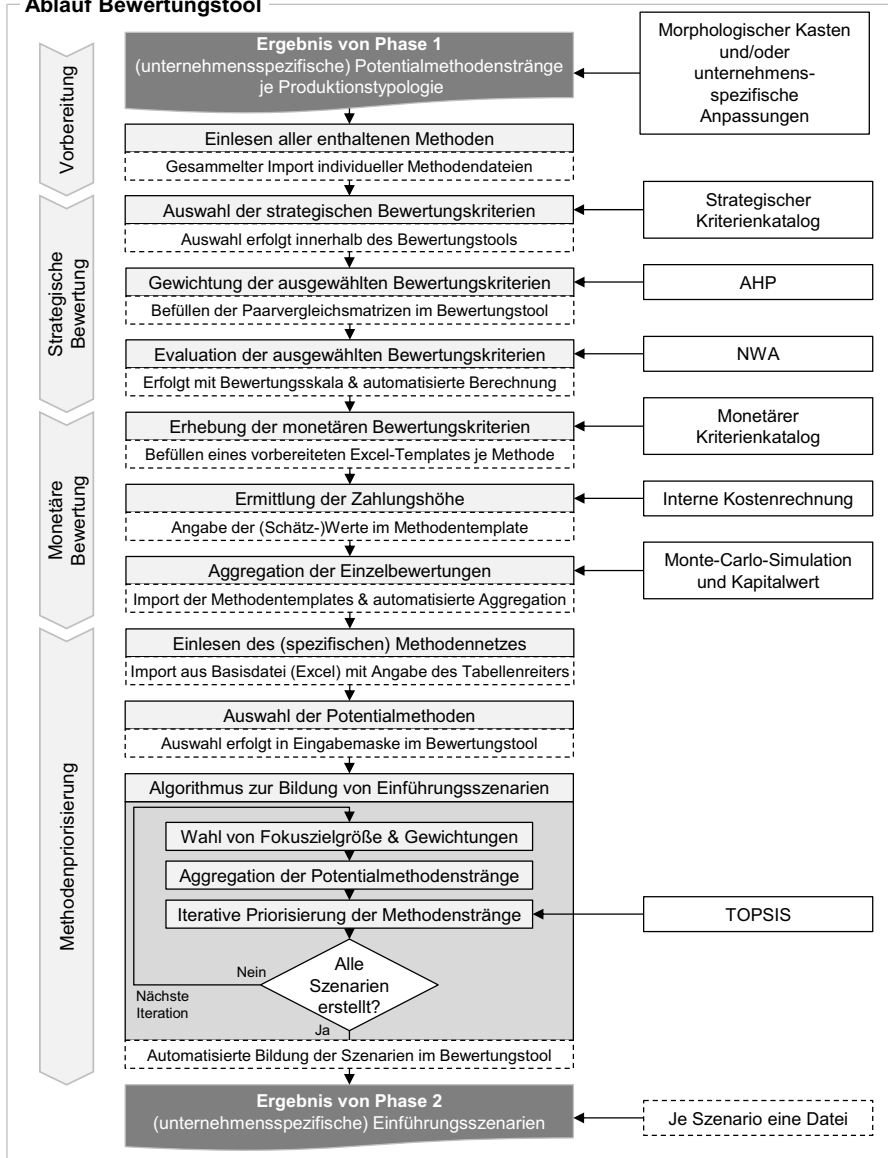
Kriterium	Beschreibung	Quelle(n)	
Einmalige Einnahmen	Veräußerungserlöse <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grundstücke, Gebäude</li> <li>▪ Anlagen, Maschinen</li> <li>▪ Sonstiges</li> </ul>	Einnahmen, die durch den Verkauf von Vermögenswerten anfallen. Dazu zählen neben Grundstücken und Gebäuden auch Maschinen und Anlagen sowie anderweitige Vermögensgegenstände.	Zangemeister (2000, S. 218)
	Bestandsminderungen <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material</li> <li>▪ Halb- und Fertigfabrikate</li> </ul>	Freiwerdung von Kapital durch die Reduzierung der Bestände, bedingt durch die Umstellung von Prozessen. Reduzierung sowohl in den Beständen der Halb- und Fertigfabrikate sowie dem Produktionsmaterial.	Zangemeister (2000, S. 218)
	Öffentliche Fördermittel	Investitionszusagen von staatlicher Seite.	Seiter & Bayrle et al. (2016, S. 47) Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150)
	Sonstige einmalige Einnahmen		
Periodische Ausgaben	Personalkosten-erhöhung <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fertigungs-personal</li> <li>▪ Logistik-personal</li> <li>▪ Gemeinkosten-löhne</li> <li>▪ Lohnneben-kosten</li> </ul>	Personalzahlungen in der direkten Produktion und Zahlungen für Personal, das nicht direkt an der Wertschöpfung beteiligt ist. Neben den Löhnen für Fertigungs- und Logistikpersonal sind auch Gemeinkostenlöhne und Lohnnebenkosten zu beachten.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150) Zangemeister (2000, S. 219)
	Miete	Mietzahlungen für Fläche oder Raum der Fabrik.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150) Zangemeister (2000, S. 219)
	Entsorgung von Abfällen und Abgaben für Emissionen	Produktions- und sonstige Abfälle müssen entsorgt werden. Hierfür fallen Zahlungen an. Für bestimmte Emissionen sind Abgaben zu entrichten.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150)
	Kosten für Wartung, Pflege, etc.	Kosten für den Erhalt der Einsatzfähigkeit und des Wertes der Vermögenswerte.	Zangemeister (2000, S. 219)
	Dienstleistungen Dritter und interner Stellen	Interne und externe Dienstleistungen, die durch die Fabrik in Anspruch genommen werden und dadurch laufende Zahlungen verursachen.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150)
	Lizenzgebühren	Zahlungen für benötigte Lizenzen, um gewisse Technologien ausführen zu können.	Seiter & Bayrle et al. (2016, S. 49)
	Materialkosten-erhöhung <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Werkstoff-kosten</li> <li>▪ Hilfs- und Betriebskosten</li> <li>▪ Energiekosten</li> </ul>	Materialkostenerhöhungen, die sich durch Umstellung des Prozesses oder der Produktion ergeben. Zu den Materialkosten können Werkstoff- sowie Hilfs- und Betriebsmittelkosten und Energiekosten gehören.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150) Zangemeister (2000, S. 219)

**Monetärer Kriterienkatalog 4/4**

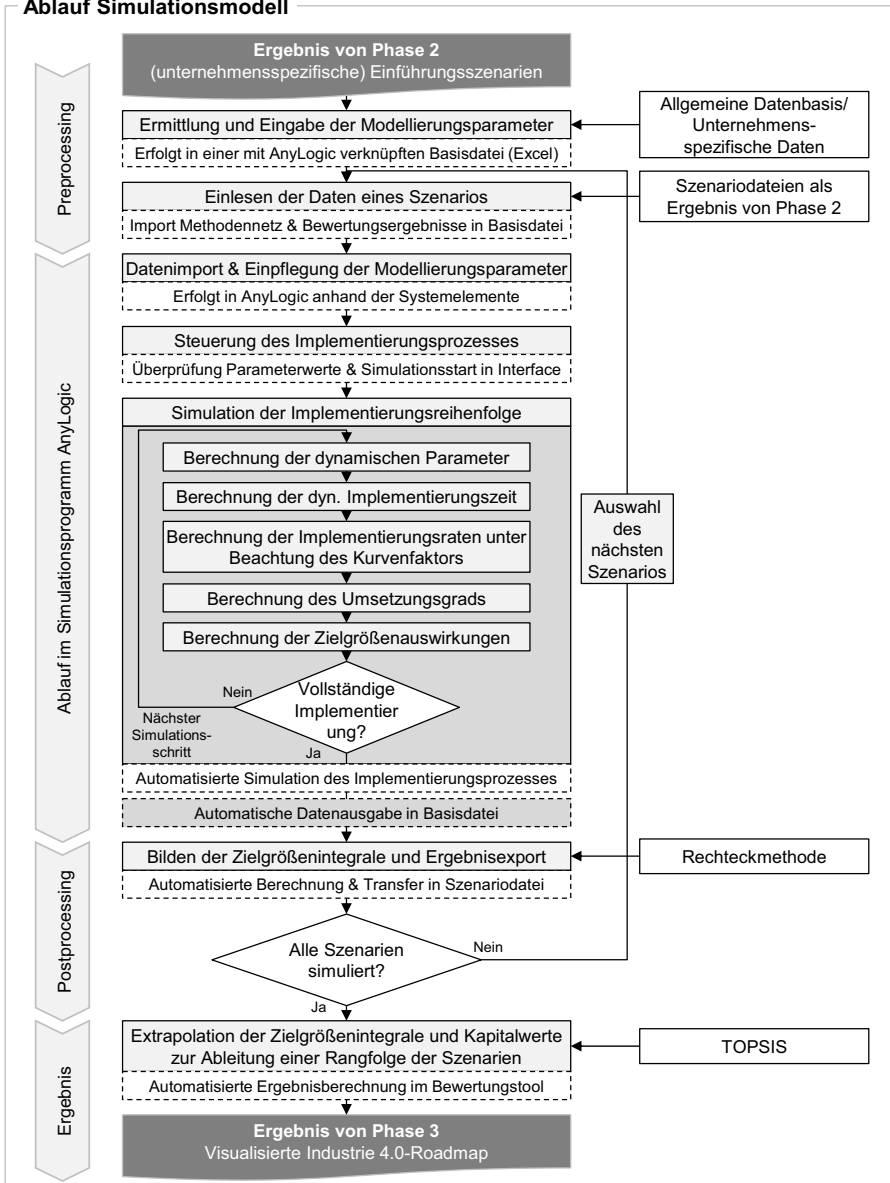
Kriterium	Beschreibung	Quelle(n)	
Periodische Ersparnisse & Erlösverbesserungen	Materialkostenreduktion <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Werkstoffkosten</li> <li>▪ Hilfs- und Betriebsmittelkosten</li> <li>▪ Energiekosten</li> </ul>	Materialkostenreduktionen, die sich durch Umstellung des Prozesses oder der Produktion ergeben. Zu den Materialkosten können Werkstoff- sowie Hilfs- und Betriebsmittelkosten und Energiekosten gehören.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150) Zangemeister (2000, S. 219)
	Personalkostenreduzierung <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fertigungslöhne</li> <li>▪ Logistikpersonal</li> <li>▪ Gemeinkostenlöhne</li> <li>▪ Lohnnebenkosten</li> </ul>	Erlöse, die sich durch Personalfreisetzung oder höhere Personaleffizienz ergeben. Neben den Löhnen für Fertigungs- und Logistikpersonal sind auch Gemeinkostenlöhne und Lohnnebenkosten zu beachten.	Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99) Brieke (2009, S. 150) Zangemeister (2000, S. 219)
	Reduzierung der Logistikkosten	Einsparungen im Bereich der Logistik außerhalb der Logistikpersonalkosten.	Pfeffer (2014, S. 65) Schulze & Brieke et al. (2012, S. 99)

### Anhang F: Ablauf Bewertungstool und Simulationsmodell

#### Ablauf Bewertungstool



**Ablauf Simulationsmodell**



## Anhang G: Empfohlenes Workshopkonzept

### Ablauf Workshopkonzept zur praktischen Durchführung der Methodik

#### Phase 1: Eingrenzung



#### Initialisierungsworkshop:

- Start in das Vorgehensmodell
- Bestimmung der Produktionstypologie
- Bestimmung der Startwerte des Umsetzungsgrads



#### Workshop zur Netzanpassung:

- Anpassung des Methodennetzes
- Bilden der unternehmensspezifischen Industrie 4.0-Vision



#### Telefonkonferenz/Workshop zum Übergang in Phase 2:

- Finale Abstimmung und Festlegung der Industrie 4.0-Vision
- Initialisierung der Bewertung der enthaltenen Industrie 4.0-Methoden



#### Bewertungsworkshop:

- Finalisierung der Bewertung der Industrie 4.0-Methoden
- Erhebung der Modellierungsparameter für die Simulation



#### Abschlussworkshop:

- Vorstellung der Simulationsergebnisse
- Beginn der Implementierungsplanung

#### Phase 2: Bewertung

#### Phase 3: Simulation



## Anhang H: Falldaten Anwendungsfall

Methoden des Anwendungspartners mit Abkürzungen	
Abkürzungen	Methodennamen
AV	Auftragsvisualisierung
AUW	Aus- und Weiterbildung
DDK	Datenaufnahme Design und Klassifizierung
DSDM	Digitale Skillmatrix und Digitale Mitarbeiterzuordnung
DSM	Digitales Shopfloor Management
DPEP	Digitalisierung der Personaleinsatzplanung
DITS	Durchgängigkeit von IT-Systemen
EKP	Erarbeiten von Kompetenzprofilen
EPD	Erfassung von Prozessdaten (u.a.) durch Maschinen und Werkzeuge
HKP	Homogenisierung von Kommunikationsprotokollen
IPA	Integration bestehender Produktionsanlagen
OID	Objektidentifikation
PF	Papierlose Fertigung (spezifischer Steckbrief durch Anwendungspartner)
VED	Verfügbarkeit von Echtzeitdaten
ZKN	Zukunftsfähige Kommunikationsnetzwerke

Interdependenzmatrix															
Methoden	AV	AUW	DDK	DSDM	DSM	DPEP	DITS	EKP	EPD	HKP	IPA	OID	PF	VED	ZKN
AV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AUW	<b>V</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>U</b>	-	-
DDK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>V</b>	-
DSDM	-	<b>V</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DSM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DPEP	<b>V</b>	-	-	-	<b>U</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DITS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>V</b>	-	-
EKP	-	<b>V</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EPD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>V</b>	-
HKP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>U</b>	-
IPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>U</b>	<b>V</b>	-
OID	<b>V</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PF	<b>V</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VED	<b>V</b>	-	-	-	<b>V</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZKN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>V</b>	-

Modellierungsparameter für Simulation															
Parameter	AV	AUW	DDK	DSDM	DSM	DPEP	DITS	EKP	EPD	HKP	IPA	OID	PF	VED	ZKN
Aufwandskategorie	3	2	3	2	3	1	4	2	2	2	3	3	3	2	2
IIG	3	2	3	2	3	3	1	2	2	2	3	1	3	2	2
TRG	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2
UG	0,25	0,25	0	0,5	0	0	0	0,25	0	0	0	0,25	0,75	0,5	0
Parallele Methoden	3														

Ausprägung der strategischen Bewertungskriterien																	
Strategische Bewertungskriterien		Gew. (je 100 %)	AV	AUW	DDK	DS DM	DSM	DP EP	DITS	EKP	EPD	HKP	IPA	OID	PF	VED	ZKN
Kosten	Betriebsmittelproduktivität	7,3 %	2	2	0	0	2	1	0	0	2	0	2	1	1	0	1
	Personalproduktivität	16,8 %	2	2	0	1	2	2	1	1	2	0	1	2	1	0	2
	Informationsfluss	59,5 %	3	0	2	1	3	3	2	0	0	3	0	3	0	3	1
	Effizienz der Planung	16,4 %	3	1	0	2	1	3	2	1	2	0	2	0	0	0	2
Zeit	Durchlaufzeit	20,0 %	2	2	0	0	2	1	1	0	1	0	1	2	0	0	1
	Time-to-Market	80,0 %	1	1	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0
Qualität	Prozesszuverlässigkeit	15,5 %	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1
	Transparenz der Prozesse & Materialflüsse	23,8 %	3	0	0	0	3	0	2	0	2	1	2	0	2	2	3
	Transparenz der Bestände	60,7 %	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	2	2	2
Mitarbeiter	Ergonomie	11,6 %	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	Arbeitsqualität	16,5 %	0	0	0	2	2	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	Qualifizierung	24,0 %	0	3	0	3	0	1	0	3	0	0	-2	2	2	-1	0
	Arbeitsmotivation	47,9 %	0	2	0	1	2	0	0	2	-1	0	0	2	0	0	1
Flexibilität	Produkt-Mix Flexibilität	23,2 %	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	2	1	3
	Personalflexibilität	15,0 %	1	3	0	2	1	3	0	2	1	0	-2	2	0	0	0
	Modularität	9,8 %	0	0	0	1	1	0	2	0	0	1	2	0	2	3	1
	Weiterentwicklungspotential	22,4 %	0	1	0	0	2	0	2	2	2	0	0	0	2	0	0
	Weiterentwicklungs-Know-how	29,6 %	0	1	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Methodenstrategiepotential und Kapitalwert						
Gewichtung	Strategiepotential					Monetär
	70 %					30 %
Methoden	Kosten	Zeit	Qualität	Mitarbeiter	Flexibilität	Kapitalwert
AV	2,76	1,20	1,32	0,00	0,38	1.169.906,4
AUW	0,65	1,20	0,00	1,68	0,97	718.971,2
DDK	1,19	0,00	0,00	0,00	0,00	-94.223,8
DSDM	1,09	0,00	0,00	1,64	0,40	-48.569,4
DSM	2,43	0,40	1,63	1,40	1,52	1.110.186,5
DPEP	2,69	0,20	0,00	0,40	0,45	36.850,9
DITS	1,69	1,80	1,08	0,00	0,94	-53.552,4
EKP	0,33	0,00	0,00	1,84	0,75	-46.262,6
EPD	0,81	1,00	1,24	-0,48	0,60	-71.526,2
HKP	1,79	0,00	0,39	0,00	0,10	-26.016,2
IPA	0,64	0,20	0,48	-0,48	0,36	-101.046,3
OID	2,19	0,40	0,16	1,72	0,53	101.847,5
PF	0,24	0,00	1,69	0,48	1,11	428.067,7
VED	1,79	0,00	1,69	-0,24	0,53	-54.581,4
ZKN	1,33	0,20	2,08	0,48	0,80	-27.098,1



## Anhang I: Simulationsergebnisse Anwendungsfall

Szenario	Implementierungsreihenfolge																
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4	Method 5	Method 6	Method 7	Method 8	Method 9	Method 10	Method 11	Method 12	Method 13	Method 14	Method 15		
Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer
100K	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   1,3	10,8   18,6	22,5   2,4	22,5   6,9	25,3   2,2	27,5   2,8	29,4   2,8	30,5   6	34,2   4,4	36   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DPEP	DITS	PF	OID	DSDM	EKP	AUW	DSM	AV	HKP		
100Z	0   18,6   11,7	2,7	11,8   4,5	14,4   4,5	16,3   7	18,6   7	23   2,3	23,6   2,2	25,3   2,8	26,4   2,8	27,5   6,9	30,3   1,3	31,1   4,4	32,9   6	36,6   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSM	OID	DPEP	DSDM	EKP	AUW	AV	HKP		
100Q	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   1,3	10,8   18,6	21,1   2,5	21,2   7	25,5   6,9	28,3   1,3	29,6   2,8	31,4   2,8	32,5   4,4	34,3   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSM	OID	DPEP	DSDM	EKP	AUW	AV	HKP		
100M	0   2,3   0	2,9   1,2	2,8   2,3	6,9   5,1	4,5   4,6	9,2   6,9	9,6   16,9	13,9   2,3	16,1   6,8	20,6   1,3	21,4   18,6	33,1   2,2	33,1   4,4	35,3   4,5			
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DSDM	EKP	AUW	VED	DSM	DPEP	DITS	PF	AV	HKP		
100F	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   2,2	11,1   2,9	12,3   2,8	13,4   18,6	25,1   2,2	25,1   6,7	29,5   1,3	30,8   6,9	33,6   4,3	35,3   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSDM	EKP	AUW	DPEP	OID	DSM	AV	HKP		
100H	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   1,3	10,8   18,6	22,5   2,4	22,5   6,9	25,3   2,2	27,5   2,8	29,4   2,8	30,5   6	34,2   4,4	36   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DPEP	DITS	PF	OID	DSDM	EKP	AUW	DSM	AV	HKP		
75K	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   1,3	10,8   18,6	22,5   2,4	22,5   6,9	25,3   2,2	27,5   2,8	29,4   2,8	30,5   6	34,2   4,4	36   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSDM	EKP	AUW	DPEP	OID	DSM	AV	HKP		
75Z	0   18,6   11,7	2,7	11,8   4,5	14,4   4,5	16,3   7	18,6   7	23   2,3	23,6   2,2	25,3   2,8	26,4   2,8	27,5   6,9	30,3   1,3	31,1   4,4	32,9   6	36,6   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSM	OID	DSDM	EKP	AUW	DPEP	AV	HKP		
75Q	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   1,3	10,8   18,6	21,1   2,5	21,2   7	25,5   6,9	28,3   2,3	28,3   2,8	31,7   1,3	32,5   4,4	34,3   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSM	OID	DSDM	EKP	AUW	DPEP	AV	HKP		
75M	0   2,3   0	2,9   1,2	2,8   2,3	6,9   5,1	4,5   4,6	9,2   6,9	9,6   16,9	13,9   2,3	16,1   6,8	20,6   1,3	21,4   18,6	33,1   2,2	33,1   4,4	35,3   4,5			
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DSDM	EKP	AUW	VED	DSM	DPEP	DITS	PF	AV	HKP		
75F	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   2,2	11,1   2,9	12,3   2,8	13,4   18,6	25,1   2,2	25,1   6,7	29,5   1,3	30,8   6,9	33,6   4,3	35,3   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSDM	EKP	AUW	DPEP	OID	DSM	AV	HKP		
75H	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   1,3	10,8   18,6	22,5   2,4	22,5   6,9	25,3   2,2	27,5   2,8	29,4   2,8	30,5   6	34,2   4,4	36   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSDM	EKP	AUW	DPEP	OID	DSM	AV	HKP		
50K	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   1,3	10,8   18,6	21,1   2,5	21,2   7	25,5   6,9	28,3   2,3	28,3   2,8	31,7   1,3	32,5   4,4	34,3   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSM	OID	DSDM	EKP	AUW	DPEP	AV	HKP		
50Z	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   1,3	10,8   18,6	21,1   2,5	21,2   7	25,5   6,9	28,3   2,3	28,3   2,8	31,7   1,3	32,5   4,4	34,3   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSDM	EKP	AUW	DPEP	OID	DSM	AV	HKP		
50Q	0   4,5   0	4,8   0	7   4,5   7	4,5   7	8,9   2,2	9,5   1,3	10,8   18,6	21,1   2,5	21,2   7	25,5   6,9	28,3   2,3	28,3   2,8	31,7   1,3	32,5   4,4	34,3   4,5		
	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSM	OID	DSDM	EKP	AUW	DPEP	AV	HKP		

Sub- naro	Implementierungsreihenfolge																																
	Methode 1		Methode 2		Methode 3		Methode 4		Methode 5		Methode 6		Methode 7		Methode 8		Methode 9		Methode 10		Methode 11		Methode 12		Methode 13		Methode 14		Methode 15				
	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	Start	Dauer	
50M	0	2,3	0	2,9	1,2	2,8	2,3	6,9	5,1	4,5	5,1	4,6	9,2	6,9	9,6	6,9	13,9	2,3	16,1	7,1	20,6	18,6	32,2	2,3	32,3	1,3	33,6	4,4	35,4	4,4			
50F	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	VED	DSM	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW			
50H	0	4,5	0	4,8	0	7	4,5	7	8,9	2,2	9,5	18,6	21,1	2,5	21,2	2,2	23,4	2,8	24,5	2,8	26,2	2,8	29	6,7	33,4	1,3	34,2	4,4	35,9	4,5			
25K	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	VED	DSM	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW			
25Z	0	4,5	0	4,8	0	7	4,5	7	8,9	2,2	9,5	18,6	21,1	2,5	21,2	2,2	23,4	2,8	24,5	2,8	26,2	2,8	29	6,7	33,4	1,3	34,2	4,4	36	4,4			
25Q	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	VED	DSM	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW			
25M	0	4,5	0	4,8	0	7	4,5	7	8,9	2,2	9,5	18,6	21,1	2,5	21,2	2,2	23,4	2,8	13,4	18,6	25,1	2,2	25,1	6,9	27,9	6,7	32,2	1,4	33,1	4,3	34,8	4,5	
25F	EPD	ZKN	IPA	DDK	VED	DITS	PF	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	VED	DSM	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW			
25H	0	4,5	0	4,8	0	7	4,5	7	8,9	2,2	9,5	18,6	21,1	2,5	21,2	2,2	23,4	2,8	23,4	2,8	24,5	2,8	26,2	2,8	29	6,7	33,4	1,3	34,2	4,4	35,9	4,5	
0K	HKP	EPD	ZKN	DDK	IPA	VED	DSM	DPEP	OID	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	VED	DSM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW
0Z	0	4,5	2,9	4,4	2,9	4,7	4,5	7	7,3	7	11,7	2	12,2	6,9	16,7	1,3	17,5	6,9	20,3	2,2	20,3	2,2	20,3	2,8	22,6	2,8	23,7	18,6	35,3	2,3	35,4	4,3	
0Q	HKP	EPD	ZKN	DDK	IPA	VED	DSM	DPEP	OID	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	VED	DSM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW
0M	HKP	EPD	ZKN	DDK	IPA	VED	DSM	DPEP	OID	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	VED	DSM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW
0F	0	4,5	2,9	4,4	2,9	4,7	4,5	7	7,3	7	11,7	2	12,2	6,9	16,7	1,3	17,5	6,9	20,3	2,2	20,3	2,2	20,3	2,8	22,6	2,8	23,7	18,6	35,3	2,3	35,4	4,3	
0H	HKP	EPD	ZKN	DDK	IPA	VED	DSM	DPEP	OID	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	VED	DSM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW	DDK	IPA	DSDM	EKP	AUW
	0	4,5	2,9	4,4	2,9	4,7	4,5	7	7,3	7	11,7	2	12,2	6,9	16,7	1,3	17,5	6,9	20,3	2,2	20,3	2,2	20,3	2,8	22,6	2,8	23,7	18,6	35,3	2,3	35,4	4,3	





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

Bisher erschienene Bände:

---

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System  
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die  
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

**Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen**

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung  
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

**Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich**

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an  
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

**Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen**

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

**Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien**

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

**Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen**

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

**Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung**

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

**Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung**

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

**Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern**

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

**Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente**

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

**Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen**

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

**Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme**

Band 16  
Dr.-Ing. Martin Ochs

**Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung**

Band 17  
Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

**Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik**

Band 18  
Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

**Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen**

Band 19  
Dr.-Ing. Rudolf Wieser

**Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen**

Band 20  
Dr.-Ing. Edgar Schmitt

**Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur**

Band 21  
Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

**Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen**

Band 22  
Dr.-Ing. Dieter Buchberger

**Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen**

Band 23  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

**Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen**

Band 24  
Dr.-Ing. Lukas Loeffler

**Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen**

Band 25  
Dr.-Ing. Thomas Friedmann

**Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren**

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

**Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung**

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

**Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem**

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

**Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder**

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

**Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen**

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

**Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen**

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

**Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben**

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

**Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen**

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

**Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen**

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

**Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik**



Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

**Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen**

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

**Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion**

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

**Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen**

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

**Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen**

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

**Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen**

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

**Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung**

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

**Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen**

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

**Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

**Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen**

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

**Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes**

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

**Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen**

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

**Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung**

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

**Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen**

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

**Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigem Fräsen von Freiformflächen**

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

**Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem**

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

**Inprocess-Geometriemessung beim Honen**

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

**Objektorientierte Projektierung von SPS-Software**

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

**Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten**

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

**Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit**

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

**Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

**Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus**

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

**Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung**

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

**Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen**

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

**Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem**

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

**Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse**

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

**Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation**

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

**Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung**

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

**Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse**

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

**Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen**

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

**Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges**

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

**Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten**

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

**Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen**

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

**Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie**

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

**Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit**

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

**Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien**

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

**Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner**

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

**Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung**

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

**Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung**

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

**Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)**

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

**Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen**

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

**Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen**

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

**Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation**

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

**Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten**

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

**Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen**

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

**Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse**

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

**Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality**

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

**Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung**

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

**Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion**

Band 90  
Dr.-Ing. Dirk Vossmann

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91  
Dr.-Ing. Martin Plass

**Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung**

Band 92  
Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung**

Band 93  
Dr.-Ing. Jürgen Brath

**Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien**

Band 94  
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

**Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung**

Band 95  
Dr.-Ing. Marco Lanza

**Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design**

Band 96  
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

**Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 97  
Dr.-Ing. Frank Reinboth

**Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren**

Band 98  
Dr.-Ing. Lutz Trender

**Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung**

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

**Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining**

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

**Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen**

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

**Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung**

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

**Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs**

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

**Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten**

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

**Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau**

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

**Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb**

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

**Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten**



Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

**Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen**

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

**Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement**

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser  
Abrasive Strahl schneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

**Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen**

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

**Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses**

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des  
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen  
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

**Turbulenzreaktionsprozesse**

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

**Fabrikplanung im turbulenten Umfeld**

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönninger

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in  
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

**Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode**

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

**Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse**

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

**Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method**

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

**Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme**

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

**Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung**

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

**Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung**

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

**Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation**

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

**Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen**

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

**Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen**

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

**Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen**

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

**Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel**

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

**Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile**

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

**Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten**

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

**Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen**

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

---

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

**Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen**

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

**Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities**

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

**Risikomanagement von Garantieleistungen**

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

**Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit**

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

**Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling**

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

**Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung**

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

**Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

**Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation**

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

**Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile**

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

**Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile**

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

**Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen**

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden  
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

**Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben**

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

**Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen**

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms  
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau  
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der  
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration  
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

**Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung**

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

**Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung**

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

**Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen**

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

**Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern**

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

**Mikroverzahnungsnormal**

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

**Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen**

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

**Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten**

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

**Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren**

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

**Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge**

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

**Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten**

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

**Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen**

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

**Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V**

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

**Servicefähigkeit**

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

**Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes**

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

**Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion**

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

**Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen**

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

**Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation**

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

**Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für  $\mu$ MIM-Bauteile**



Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

**Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe**

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

**Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetriebe**

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

**Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen**

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

**Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4**

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

**Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen**

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

**Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen**

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

**Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln**

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

**Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen**

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

**Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

**Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen**

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

**Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebsselementen**

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

**Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken**

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

**Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4**

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

**Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge**

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

**Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen**

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

**Robustheit verketteter Produktionssysteme**

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

**Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen**

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

**Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen**

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

**Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation**

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

**Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung**

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

**Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren**  
ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

**Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse**

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

**Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion**

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

**Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen**

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

**Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments**

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

**Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe**

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

**Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben**

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

**Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

**Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

**Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

**Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung**

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

**Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette  
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels  
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-  
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

**Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken**

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit  
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-  
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch  
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-  
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

**Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound**

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

**Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen**

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

**Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung**

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

**Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme**

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

**Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4**

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

**Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen**

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

**Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren**

Band 230  
Dr.-Ing. Tom Stähr

**Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung**

Band 231  
Dr.-Ing. Jan Schwennen

**Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile**

Band 232  
Dr.-Ing. Sven Coutandin

**Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem**

Band 233  
Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

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



