

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
TUM School of Engineering and Design

## **Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme**

**Georg Florian Höllthaler**

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Die Dissertation wurde am 26.07.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 07.02.2022 angenommen.



## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV in Augsburg sowie am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, für die wohlwollende Unterstützung dieser Arbeit sowie für die kontinuierliche Förderung meiner Tätigkeiten am Institut. Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl, dem Leiter des Lehrstuhls für Maschinenelemente, danke ich für die Übernahme des Korreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub, dem Leiter des Lehrstuhls für Produktionstechnik und Energiespeichersysteme, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Für die konstruktiven Diskussionen, die wertvollen Hinweise sowie die gründliche Durchsicht meiner Arbeit danke ich Katja Kristall, Matthias Glonegger, Eric Unterberger und Jan Klöver-Koch. Darüber hinaus danke ich Katja auch für die thematisch übergreifenden Diskussionen und Matthias dafür, mich für diesen spannenden Weg in meiner persönlichen Entwicklung motiviert zu haben. Eric und Jan danke ich für die Zeit als Bürokollegen am Institut sowie für die hieraus entstandene Freundschaft. Zudem möchte ich mich auch bei allen Kolleginnen und Kollegen für die Zeit am Institut, auf welche ich gerne zurückblicken werde, bedanken.

Schließlich danke ich meinen Eltern, Katharina und Josef, für den Rückhalt und die Förderung meiner Ausbildung.

Der größte Dank gilt dir, Stefanie. Ich danke dir, meiner Freundin, meiner Partnerin, meiner Lebensgefährtin, meiner Ehefrau und Mutter unserer wundervollen Kinder, für die Motivation und Unterstützung in den unterschiedlichen Phasen meines Promotionsvorhabens. Ich blicke gerne auf unser bisher Erlebtes zurück, genieße die gemeinsame Zeit mit dir und unserer Familie und freue mich auf alles, was wir gemeinsam noch erleben werden. Dir sei diese Arbeit gewidmet.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Motivation der Arbeit .....	3
1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen .....	5
1.4 Einordnung in die Wissenschaftssystematik .....	6
1.5 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit .....	7
<b>2 Stand des Wissens.....</b>	<b>11</b>
2.1 Überblick .....	11
2.2 Ganzheitliche Produktionssysteme .....	11
2.2.1 Allgemeines .....	11
2.2.2 Bezugsrahmen und Merkmale .....	12
2.2.3 Zielgrößen.....	16
2.2.4 Vorgehen zur Gestaltung.....	22
2.2.5 Wertstrommethode .....	23
2.3 Digitalisierung in der Produktion .....	25
2.3.1 Allgemeines .....	25
2.3.2 Grundlegende Begriffe zu Information in der Produktion .....	25
2.3.3 Digitale Technologien: Definition, Einordnung und Aufgaben....	28
2.3.4 Informationsflussorientierter Einsatz digitaler Technologien.....	31

2.4	Ansätze zur Integration digitaler Technologien.....	32
2.4.1	Allgemeines .....	32
2.4.2	Eigenschaftsbasierte Ansätze.....	32
2.4.3	Prozessorientierte Ansätze.....	35
2.5	Ansätze zur Modellierung von Wertströmen.....	37
2.5.1	Allgemeines .....	37
2.5.2	Ansätze zur Abbildung von Material- und Informationsflüssen ...	37
2.5.3	Ansätze zur Modellierung von Wirkzusammenhängen.....	41
2.6	Spezifische Ansätze der Wertstrommethode .....	43
2.6.1	Allgemeines .....	43
2.6.2	Materialflussorientierte Ansätze.....	43
2.6.3	Informationsflussorientierte Ansätze.....	45
<b>3</b>	<b>Konzeption der Methodik.....</b>	<b>49</b>
3.1	Überblick.....	49
3.2	Folgerungen .....	49
3.3	Handlungsbedarf.....	50
3.4	Anforderungen an die Methodik.....	53
3.4.1	Allgemeines .....	53
3.4.2	Formalisierung .....	54
3.4.3	Informationsbezogene Gestaltung .....	55
3.4.4	Wirkzusammenhänge.....	55
3.4.5	Vorgehensweise .....	56
<b>4</b>	<b>Beschreibung der Methodik .....</b>	<b>57</b>
4.1	Überblick.....	57
4.2	Komponenten.....	57
4.3	Aufbau.....	58



<b>5</b>	<b>Strukturmodell zur Integration digitaler Technologien.....</b>	<b>59</b>
5.1	Überblick .....	59
5.2	Formalisierung informationsflussorientierter Wertströme .....	59
5.2.1	Allgemeines .....	59
5.2.2	Klassifizierung von Informationsflussteilnehmern .....	59
5.2.3	Transformationsarten von Daten und Informationen .....	62
5.2.4	Identifikation von Funktionen des Informationsflusses .....	63
5.2.5	Schematisierung von informationsflussorientierten Wertströmen .....	66
5.2.6	Parameter des informationsflussorientierten Wertstroms .....	69
5.3	Informationsbezogene Gestaltung von Wertströmen .....	75
5.3.1	Allgemeines .....	75
5.3.2	Zielsetzungen von Informationsfluss und Informationslogistik....	75
5.3.3	Herleitung informationsbedingter Verschwendungsarten.....	77
5.3.4	Herleitung informationsbezogener Gestaltungsansätze .....	81
5.4	Modellierung von Wirkzusammenhängen in Wertströmen .....	88
5.4.1	Allgemeines .....	88
5.4.2	Systemtheoretische Einordnung .....	88
5.4.3	System Dynamics zur Modellierung von Wertströmen .....	89
5.4.4	Charakterisierung des Untersuchungsgegenstands .....	91
5.4.5	Abbildung der qualitativen Modellstruktur .....	92
5.4.6	Entwicklung des System-Dynamics-Modells .....	95
5.4.7	Verifikation und Validierung der Modellbildung .....	105
5.5	Fazit .....	107
<b>6</b>	<b>Vorgehensweise zur Integration digitaler Technologien.....</b>	<b>109</b>
6.1	Überblick .....	109
6.2	Informationsflussorientierte Wertstromanalyse .....	109
6.2.1	Beschreibung der Vorgehensweise .....	109

6.2.2	Ermittlung der Produktfamilie und Produktionsprozesskette.....	110
6.2.3	Informationsflussorientierte Wertstromaufnahme.....	111
6.2.4	Identifikation von Verschwendung.....	115
6.2.5	Ursache-Wirkungs-Analyse.....	116
6.3	Informationsflussorientiertes Wertstromdesign.....	118
6.3.1	Beschreibung der Vorgehensweise.....	118
6.3.2	Generierung gestaltungsansatzbasierter Maßnahmen .....	118
6.3.3	Entwicklung eines verschwendungsarmen Soll-Wertstroms .....	120
6.3.4	Ermittlung der prozessualen Integration digitaler Technologien	122
6.4	Bewertung der Integration digitaler Technologien.....	126
6.4.1	Beschreibung der Vorgehensweise.....	126
6.4.2	Erstellung eines Referenzmodells zum Wertstrom.....	126
6.4.3	Ermittlung von Integrationsszenarien.....	128
6.4.4	Prognose der Auswirkungen von Integrationsszenarien .....	130
6.4.5	Vergleich von Integrationsszenarien .....	131
6.5	Fazit.....	132
<b>7</b>	<b>Anwendung.....</b>	<b>135</b>
7.1	Überblick.....	135
7.2	Anwendungsbeispiel .....	135
7.2.1	Produktionssystem, Produkt und Produktionsprozesskette .....	135
7.2.2	Betrachtetes Informationssystem.....	136
7.3	Anwendung der entwickelten Methodik.....	137
7.3.1	Informationsflussorientierte Wertstromanalyse.....	137
7.3.2	Informationsflussorientiertes Wertstromdesign.....	143
7.3.3	Bewertung der Integration digitaler Technologien.....	147
7.4	Fazit.....	149

<b>8 Kritische Würdigung.....</b>	<b>151</b>
8.1 Überblick .....	151
8.2 Technisch-wirtschaftliche Bewertung .....	151
8.2.1 Allgemeines .....	151
8.2.2 Aufwand .....	151
8.2.3 Nutzen.....	152
8.2.4 Vorgehen .....	153
8.3 Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Anwendung .....	154
8.4 Limitationen.....	156
8.5 Erfüllung der Anforderungen an die Methodik .....	157
8.6 Fazit .....	158
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>159</b>
9.1 Zusammenfassung .....	159
9.2 Ausblick .....	161
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>163</b>
<b>Angeleitete Studierende .....</b>	<b>205</b>



## Abkürzungsverzeichnis

AP	Auftragspapiere
Auto-ID	automatische Identifizierung
AV	Arbeitsvorgang
B	Balancing Loop
BM	Betriebsmittel
BP	Bestandspapiere
BPMN	Business Process Model and Notation
BZ	Bearbeitungszeit
DB	Datenbank
DLZ	Durchlaufzeit
EN3	Engineering Notation 3
EPEI	Every Part Every Interval
EPK	ereignisgesteuerte Prozessketten
ERP	Enterprise Resource Planning
FIFO	First In First Out
GPS	Ganzheitliches Produktionssystem
HV	Hauptvariante
IFT	Informationsflussteilnehmer
IS	Integrationsszenario
JIS	Just in Sequence
KB	Kundenbedarf
KT	Kudentakt
LOS	Losgröße
LG	Leistungsgrad
LV	Leistungsverlust
M	Maßnahme
MA	Mitarbeiter
MAW	Mitarbeiterwissen
MES	Manufacturing Execution System
MTBF	Mean Time Between Failures

MTTR	Mean Time To Repair
n. def.	nicht definiert
OEE	Overall Equipment Effectiveness
org.	organisatorisch
PB	Pufferbestand
PG	Produktivitätsgrad
PL	Produktionsleiter
PLS	Produktionsleitsystem
PLZ	Produktionslaufzeit
PM	Prozessmenge
PP	Produktionsprozess
PT	Personentag
PV	Produktvariante
PZ	Prozesszeit
QG	Qualitätsgrad
QV	Qualitätsverlust
RFID	Radio-frequency Identification
RM	Referenzmodell
RTLS	Real-Time Locating System
RW	Reichweite
RZ	Rüstzeit pro Vorgang
Stk	Stück
TA	Taktausgleich
TAV	Teilarbeitsvorgang
tAZ	tägliche Arbeitszeit
TB	Tagesbedarf
TM	Transportmenge
TPZ	Transportzeit
TZ	Taktzeit
UML	Unified Modeling Language
U	Ursache
V	Verlust

V&V	Verifikation und Validierung
VG	Verfügbarkeitsgrad
VV	Verfügbarkeitsverlust
WLAN	Wireless Local Area Network
WZ	Wasserzähler
WZP	Wasserzählerplatine
ZE	Zeiteinheit
ZV	Zeitverlust
ZZ	Zykluszeit





# Symbolverzeichnis

## Lateinische Symbole

#AT	Anzahl Arbeitstage pro Jahr
#BM	Anzahl Betriebsmittel
#gPK	Anzahl gleicher Produktkomponenten
#IS	Anzahl Integrationsszenarien
#PV	Anzahl Produktvarianten
a	Jahr(e)
$A_m(t)$	Ausschuss von Produktionsprozess m zum Zeitpunkt t
$A_x$	Aktion x
$AR_m(t)$	Ausschussrate von Produktionsprozess m zum Zeitpunkt t
b	Anzahl von prozessualen Integrationen
$B_x$	Bedingung x
c	Integrationstiefe
d	Tag(e)
$DLZ_m$	Durchlaufzeit eines Schritts m
e	eulersche Zahl
$EPEI_m$	Every Part Every Interval eines Produktionsprozesses m
$f(x)$	Funktion f von x
g	Element ganzer Zahlen
i	Zählvariable
m	Schritt in einer Produktionsprozesskette
m-1	vorgelagerter Schritt in einer Produktionsprozesskette
m+1	nachgelagerter Schritt in einer Produktionsprozesskette
n	Länge einer Produktionsprozesskette
$P_m(t)$	fehlerfreie Produkte von Produktionsprozess m zum Zeitpunkt t
$PB_\emptyset$	durchschnittlicher Pufferbestand
$PB_m(t)$	Pufferbestand von Produktionsprozess m zum Zeitpunkt t
$PB_{max}$	maximaler Pufferbestand
$PB_{min}$	minimaler Pufferbestand
$PG_m$	Produktivitätsgrad eines Produktionsprozesses m

$PP_m$	Produktionsprozess m
$PR_m(t)$	Produktate von Produktionsprozess m zum Zeitpunkt t
$QG_m$	Qualitätsgrad eines Produktionsprozesses m
$QV_{AA}$	Qualitätsverlust durch Anlaufausschuss
$QV_{PA}$	Qualitätsverlust durch Produktionsausschuss
s	Sekunde(n)
t	Zeit(punkt)
$t_0$	Zeitpunkt zu Simulationsbeginn
$TR_m(t)$	Transportrate zu Puffer m zum Zeitpunkt t
$\ddot{U}R_m(t)$	Übergangsrate von Produktionsprozess m zum Zeitpunkt t
$V_A$	Verlust durch Ablaufdefizit
$V_{AA}$	Verlust durch Anlaufausschuss
$V_{AL}$	Verlust durch Anlauf
$V_{eb}$	extern bedingte Verluste
$V_{ib}$	intern bedingte Verluste
$V_K$	Verlust durch Kurzstillstand
$V_L$	Verlust durch Langsamlauf
$V_m(t)$	Verluste von Produktionsprozess m zum Zeitpunkt t
$V_{oA}$	Verlust durch fehlende Aufträge („ohne Auftrag“)
$V_{oS_n}$	Verlust durch organisatorische Störungen nachgelagert
$V_{oS_v}$	Verlust durch organisatorische Störungen vorgelagert
$V_P$	Verlust durch Pausen
$V_{PA}$	Verlust durch Produktionsausschuss
$V_R$	Verlust durch Rüsten
$V_{tS}$	Verlust durch technische Störung
$V_W$	Verlust durch Wartung
$VB_m(t)$	Verarbeitungsbestand von Produktionsprozess m zum Zeitpunkt t
$ZV_A$	Zeitverlust durch Ablaufdefizit
$ZV_{AL}$	Zeitverlust durch Anlauf
$ZV_K$	Zeitverlust durch Kurzstillstand
$ZV_L$	Zeitverlust durch Langsamlauf
$ZV_{oA}$	Zeitverlust durch fehlende Aufträge („ohne Auftrag“)

$ZV_{oS_n}$	Zeitverlust durch organisatorische Störungen nachgelagert
$ZV_{oS_v}$	Zeitverlust durch organisatorische Störungen vorgelagert
$ZV_P$	Zeitverlust durch Pausen
$ZV_R$	Zeitverlust durch Rüsten
$ZV_{tS}$	Zeitverlust durch technische Störung
$ZV_W$	Zeitverlust durch Wartung

### Griechische Symbole

$\alpha$	Formparameter
$\beta$	Skalierungsparameter
$\Gamma$	Gamma-Funktion
$\Delta$	Differenz bei der Ermittlung von prozessualer Integration
$\eta$	Verfügbarkeit
$\lambda$	Ausfallrate



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Mit einer Bruttowertschöpfung in Höhe von 2,2 Billionen Euro und 7,5 Millionen Beschäftigten (STATISTISCHES BUNDESAMT 2020) ist das verarbeitende Gewerbe<sup>1</sup> von besonderer Bedeutung für die Wirtschaftsleistung und den Wohlstand in Deutschland (ABELE & REINHART 2011). Seine produzierenden Unternehmen haben sich Herausforderungen wie der Dynamisierung von Produktlebenszyklen, der Individualisierung von Produkten und Prozessen, der Ressourcenverknappung sowie der Durchdringung mit neuen Technologien zu stellen. Zugleich müssen produzierende Unternehmen für den Erhalt und die Ausweitung ihrer Wertschöpfung sowie globalen Wettbewerbsfähigkeit sorgen (ABELE & REINHART 2011, WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016). Damit produzierende Unternehmen trotz der gegebenen Herausforderungen in Hochlohnländern wie Deutschland weiterhin wirtschaftlich agieren können, müssen Produktionsabläufe effektiv und effizient gestaltet sein, um Produkte schnell, flexibel und ressourcenschonend herstellen zu können (WIENDAHL ET AL. 2014, SCHATZ & BAUERNHANSL 2017).

Die Durchdringung mit neuen Technologien kann insbesondere in Bezug auf den Megatrend der Digitalisierung als Chance genutzt werden, um den anderen genannten Herausforderungen zu begegnen, zumal die Tragweite des Einsatzes digitaler Technologien bisher noch unterschätzt wird (KAGERMANN ET AL. 2016, BITSCH 2019). Digitalisierung wird sich mittels eines flächendeckenden Einsatzes digitaler Technologien durch nahezu alle Bereiche der Wirtschaft ziehen und gesamte Unternehmen werden sich durch ihre digitale Transformation von Grund auf verändern (KRAUSE & PELLENS 2018, LIPSMEIER ET AL. 2018). Die Digitalisierung durchdringt unaufhaltsam auch die industrielle Produktion in allen Branchen (JACOB 2019) und ist Veränderungstreiber ihrer Prozesse (BITSCH 2019). In produzierenden Unternehmen kann der zielgerichtete Einsatz digitaler Technologien Wertschöpfungspotenziale in Produktionssystemen mobilisieren und freisetzen (BLOCHING ET AL. 2015, LIPSMEIER ET AL. 2018), indem die digitale Unterstützung der Wertschöpfung kunden- und prozessorientiert sowie zur Vermeidung von Verschwendung erfolgt (DOMBROWSKI ET AL. 2018B, HARTMANN ET AL. 2018A). Digitale Technologien im Produktionskontext ba-

---

<sup>1</sup> Als Teil des produzierenden Gewerbes repräsentiert das verarbeitende Gewerbe produzierende Unternehmen, die Produkte für den Ge- und Verbrauch oder Vorprodukte zur weiteren Be- und Verarbeitung herstellen (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008).

sieren auf Informations- und Kommunikationstechnologien und fokussieren die Verbesserung von Informationsflüssen entlang der Wertschöpfung von Produkten (BISCHOFF ET AL. 2015, KOLBERG ET AL. 2017A).

Unter den Maßgaben der eingangs aufgeführten Herausforderungen und der Ausrichtung der Wertschöpfung produzierender Unternehmen am Kunden mit Prozessen frei von Verschwendung hat sich das Paradigma Ganzheitlicher Produktionssysteme über die letzten Jahrzehnte als Leitbild für die Gestaltung von Produktionsabläufen etabliert (REINHART & ZÜHLKE 2017). Alle erbrachten Prozesse sollen einen Kundennutzen erzeugen, indem die Wertschöpfung von Produktionsabläufen durch Wertstromorientierung maximiert wird (DOMBROWSKI & MIELKE 2015A, DIEKMANN 2017). In diesem Rahmen adressieren Ganzheitliche Produktionssysteme die Realisierung effektiver und effizienter Prozesse, indem die den Wertströmen zugehörigen Material- und Informationsflüsse an dem Leitbild ausgerichtet werden (BLEHER 2014, DROSTE ET AL. 2015). Die Produktionsabläufe von etwa zwei Dritteln der produzierenden Unternehmen<sup>2</sup> sind wertstromorientiert organisiert (STAUFEN AG & PTW 2016), wodurch geeignete sowie notwendige Voraussetzungen für die Digitalisierung von Wertströmen und für den Einsatz digitaler Technologien zur Handhabung von produktionsrelevanten Informationen gegeben sind (IFAA 2016, METTERNICH ET AL. 2017, ROSSINI ET AL. 2019). Dadurch können positive Effekte auf die mit den Informationsflüssen gekoppelten Materialflüsse bewirkt werden (SPATH ET AL. 2017, VDMA & PTW 2018). Neben den Wertschöpfungspotenzialen durch die Orientierung am Leitbild Ganzheitlicher Produktionssysteme lassen sich durch die Integration und den Einsatz digitaler Technologien in Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme Synergien nutzbar machen und weitere Wertschöpfungspotenziale realisieren (BICK 2014, DOMBROWSKI ET AL. 2017A, SODER 2017, BAUER ET AL. 2018), indem die Akteure der Produktion wie Menschen, Maschinen und Material durch digitalisierte Informationsflüsse materialflussorientiert miteinander vernetzt werden (METTERNICH ET AL. 2017, MEUDT ET AL. 2017B). Durchlaufzeiten und Ausschuss können dadurch reduziert und gleichzeitig Produktivität und Flexibilität erhöht werden (HARTMANN ET AL. 2018B). Derartige Veränderungen sollen anhand ihrer Auswirkungen auf die Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme bewertet werden können (DOMBROWSKI ET AL. 2005, DOMBROWSKI ET AL. 2018A). Die wertstromorientierte<sup>3</sup> Integration digitaler Technologien wird hierbei als entscheidender Schlüsselfaktor gesehen, um die Vernetzung der Stufen der Wertschöpfungskette und der

---

<sup>2</sup> Die Ergebnisse beziehen sich auf eine Studie, an der 1526 Führungskräfte von produzierenden Unternehmen aus den Ländern Deutschland, Österreich und Schweiz teilgenommen haben (STAUFEN AG & PTW 2016).

<sup>3</sup> Wertstromorientierung wurde von 88 % der 122 befragten Studienteilnehmer mit wichtig oder sehr wichtig bewertet, damit digitale Technologien erfolgreich integriert werden können (STAUFEN AG 2015).

beteiligten Akteure durchgängig, anpassungsfähig, effizient und effektiv gestalten zu können (JACOBI & LANDHERR 2013, STAUFEN AG 2015, PRINZ ET AL. 2018, WIEGAND 2018).

### **1.2 Motivation der Arbeit**

Ganzheitliche Produktionssysteme und ihre Merkmale sind in produzierenden Unternehmen weit verbreitet und bieten geeignete Voraussetzungen, um zielgerichtet digitale Technologien zur Verbesserung von Produktionsabläufen einsetzen zu können (STAUFEN AG & PTW 2016). In der Praxis zeigt sich, dass produzierende Unternehmen digitale Technologien in ihren Produktionssystemen einbinden, wenn wirtschaftliche Potenziale zu erwarten sind und dadurch die Wettbewerbsfähigkeit unterstützt wird (BISCHOFF ET AL. 2015, MCKINSEY DIGITAL 2016). FISCHER & SCHEIBELER (2003) sowie CONRAD & AUSILIO (2016) beziffern den Anteil wertschöpfender Aktivitäten in produzierenden Unternehmen auf gerade einmal ca. 25 %. Die anderen Aktivitäten sind als nicht-wertschöpfend bzw. als Verschwendung einzustufen (FISCHER & SCHEIBELER 2003, CONRAD & AUSILIO 2016). Digitale Technologien sollen daher in diesem Zusammenhang eine Produktivitätssteigerung in Wertströmen ermöglichen, indem Informationsflüsse zielgerichtet verändert und dadurch Verschwendungen in Materialflüssen beseitigt werden (MEUDT ET AL. 2017B, HARTMANN ET AL. 2018A).

In Zukunft werden immer mehr digitale Technologien in Produktionssystemen Einzug halten (SIEDLER ET AL. 2019A), wobei ihre zielgerichtete und wertstromorientierte Integration entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen ist (DOMBROWSKI ET AL. 2018A, SIEDLER ET AL. 2019B). Aufgrund der Zunahme verfügbarer digitaler Technologien in Verbindung mit der steigenden Varianz von Produktionsabläufen resultiert ein exponentieller Anstieg der Integrations- und Einsatzmöglichkeiten digitaler Technologien in den Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme (KOLBERG & ZÜHLKE 2015, FRIEDLAND 2018). Jedoch lässt sich die Nutzentransparenz des Einsatzes digitaler Technologien nur bedingt im Voraus einschätzen (WISCHMANN ET AL. 2016), da die Auswirkungen auf die Wertströme aufgrund unergründeter Wirkzusammenhänge innerhalb der Wertströme nur eingeschränkt beurteilt werden können (DOMBROWSKI & RICHTER 2016, DOMBROWSKI ET AL. 2017B). Wegen der fehlenden Nutzentransparenz und der dadurch erschwerten Bewertbarkeit der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in digitale Technologien tendieren viele Unternehmen dazu, von der Integration digitaler Technologien in ihren Wertströmen abzusehen (DELOITTE 2016, WISCHMANN ET AL. 2016). Diese Tendenz

wird dadurch verstärkt, dass sich der Einsatz digitaler Technologien nicht immer positiv auf die Wirtschaftlichkeit und Produktivität von Wertströmen auswirkt (LANGLOTZ & AURICH 2019). Diesbezüglich führt eine Studie am Beispiel des Maschinenbaus auf, dass der Einsatz digitaler Technologien nicht immer die erwartete Produktivitätssteigerung bewirkt, sondern zu einem Produktivitätsrückgang führen kann. Dieser als Produktivitätsparadoxon betitelte Zusammenhang hebt hervor, dass der Einsatz digitaler Technologien oftmals nur zu einer unzureichenden Produktivitätssteigerung von Produktionsabläufen und den wertschöpfenden Prozessen auf dem Shopfloor führt. Hierbei stehen der Aufwand aufgrund getätigter Investitionen in digitale Technologien und der Nutzen durch eine etwaige Produktivitätssteigerung in einem unwirtschaftlichen Verhältnis zueinander (VDMA 2018). Als Ursache hierfür ist aufzuführen, dass bei der Entscheidung für die Integration von digitalen Technologien häufig deren Technologiereife im Fokus der Betrachtung steht (SCHUH ET AL. 2017, UNGERN-STERNBERG ET AL. 2019) und folglich die erwarteten Verbesserungen von unterstützenden Prozessen in Wertströmen nicht eintreten. Die Klassifizierung, Strukturierung und Bewertung digitaler Technologien für eine wertschöpfende und wertstromorientierte Integration in den bestehenden Produktionsabläufen stellt produzierende Unternehmen weiterhin vor große Herausforderungen, da die Auswirkungen des Einsatzes digitaler Technologien nur eingeschränkt identifizierbar und nicht transparent nachvollziehbar sind (KAGERMANN ET AL. 2016, WAGNER ET AL. 2017, LIPSMEIER ET AL. 2018, WIEGAND 2018, KORNE ET AL. 2019).

Neben negativen Beispielen des Einsatzes digitaler Technologien aus der industriellen Praxis, in denen das oben aufgeführte Produktivitätsparadoxon begründet ist, existieren aber auch zahlreiche positive Beispiele, bei denen der Einsatz digitaler Technologien Produktivitätssteigerungen bewirkt hat (REINHART & BAUERNHANSL 2020). In diesem Problemkontext soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten, um für produzierende Unternehmen Transparenz bei geplanten Investitionen in digitale Technologien zu schaffen. Hierbei sollen die Art und Weise, wie digitale Technologien in Wertströmen einzusetzen sind, aufgezeigt werden, indem eine geeignete Integration digitaler Technologien zur Verbesserung von Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme ermittelt wird.



## 1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Ausgangssituation und Motivation gilt es, in der vorliegenden Arbeit die folgenden Aspekte zu adressieren:

- Identifikation von Wertschöpfungspotenzialen in Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme durch die Veränderung von Informationsflüssen
- Generierung prozessbezogener Maßnahmen der Integration digitaler Technologien, um Verbesserungen in Wertströmen zu bewirken
- Modellierung von Wirkzusammenhängen innerhalb von Wertströmen, die durch die Integration digitaler Technologien resultieren

Um in diesem Zusammenhang die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Investitionsentscheidungen in die Anpassung vorhandener oder Einbringung neuer digitaler Technologien sicherstellen zu können, ist es notwendig, dass diese eine Steigerung von Wertschöpfung und eine Reduzierung von Verschwendung in Wertströmen von Produktionsabläufen bewirken. Hierbei stellt sich die Frage nach einer geeigneten Integration digitaler Technologien in den Wertströmen bestehender Ganzheitlicher Produktionssysteme, woraus sich die folgende Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ableiten lässt:

### **Entwicklung einer Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme**

Digitale Technologien sollen in Bezug auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit formalisiert werden, um ihre Fähigkeiten und Auswirkungen auf Wertströme abbilden zu können. Zudem wird ein Leitbild zur informationsbezogenen Gestaltung von Wertströmen benötigt, wie produktionsrelevante Informationen zu handhaben sind und Verschwendung durch digitale Technologien reduziert werden kann. Werden digitale Technologien in Wertströmen integriert, so bedarf es darüber hinaus der Ermittlung resultierender Wirkzusammenhänge innerhalb betrachteter Wertströme. Zur Anwendung dieser Schwerpunkte soll zudem eine nutzerzentrierte Vorgehensweise bei der Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme methodisch unterstützen. In diesem skizzierten Bezugsrahmen zur Entwicklung der Methodik werden folglich die vier Schwerpunkte *Formalisierung*, *informationsbezogene Gestaltung*, *Wirkzusammenhänge* und *Vorgehensweise* adressiert. Zu diesen Schwerpunkten sollen die folgenden Forschungsfragen im Rahmen der vorliegenden Arbeit fokussiert werden:

**Formalisierung:** Wie sind Wertströme Ganzheitlicher Produktionssysteme in Bezug auf digitale Technologien zu formalisieren?

**Informationsbezogene Gestaltung:** Wie lassen sich die Wertströme Ganzheitlicher Produktionssysteme durch die Integration digitaler Technologien gestalten?

**Wirkzusammenhänge:** Wie sind Wirkzusammenhänge in Wertströmen, die bei der Integration digitaler Technologien resultieren, abzubilden und Auswirkungen auf die Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme zu ermitteln?

**Vorgehensweise:** Wie ist eine Vorgehensweise zu gestalten, um die Integration digitaler Technologien für ein unternehmensspezifisches Ganzheitliches Produktionssystem zu unterstützen?

### 1.4 Einordnung in die Wissenschaftssystematik

Die vorliegende Arbeit verfolgt die Zielsetzung, Produktionsverantwortliche bei der Integration digitaler Technologien methodisch zu unterstützen, indem die Auswirkungen der Integration digitaler Technologien auf die Wertströme Ganzheitlicher Produktionssysteme ermittelt werden. Hierbei sollen Produktionsverantwortliche hinsichtlich der Entwicklung und Beurteilung von Handlungsalternativen bei der Integration bereits vorhandener sowie der Integration weiterer digitaler Technologien für bestehende Ganzheitliche Produktionssysteme angeleitet werden. Vor dem Hintergrund dieser Zielsetzung wird nachstehend die Einordnung der vorliegenden Arbeit in die Wissenschaftssystematik beschrieben.

Während Formalwissenschaften ohne erforderlichen Realitätsbezug die Konstruktion und Verwendung von Zeichensystemen und Regeln fokussieren, vereinigen Realwissenschaften die Beschreibung, Erklärung sowie Gestaltung empirisch wahrnehmbarer Ausschnitte der Realität. Die Realwissenschaften adressieren sowohl Grundlagenwissenschaften, um Ausschnitte der Realität mit Erklärungsmodellen zu beschreiben, als auch Handlungswissenschaften zur Analyse menschlicher Handlungsalternativen. Realwissenschaften sind der faktischen Wahrheit unterworfen. Sie benötigen jedoch auch die Zeichensysteme und Regeln aus den Formalwissenschaften (ULRICH & HILL 1976), sodass mitunter ingenieurwissenschaftliche Zusammenhänge erforscht werden können (BERGHOLZ 2005).

Handlungswissenschaften adressieren im Rahmen anwendungsorientierter Forschung eine konstruktive Unterstützung des Menschen bei der „(..) Gestaltung und Auswahl von Handlungsalternativen“ (WEMHÖNER 2006). Aufgrund der Interdisziplinarität ingenieurwissenschaftlicher Problemstellungen ist eine eindeutige Zuord-

nung zu den Handlungswissenschaften oftmals nicht möglich, da zum einen Zusammenhänge empirischer Ausschnitte der Realität erklärt und zum anderen die Analyse menschlicher Handlungsalternativen im Rahmen anwendungsorientierter Forschung betrachtet werden sollen. Die vorliegende Arbeit adressiert innerhalb der Realwissenschaften primär die Analyse menschlicher Handlungsalternativen vor dem Hintergrund der definierten Zielsetzung.

In diesem Zusammenhang sind Menschen bei der Gestaltung und Auswahl von Handlungsalternativen konstruktiv zu unterstützen, wofür mitunter Erklärungen empirischer Ausschnitte der Realität notwendig sind. Die vorliegende Arbeit mit dem Anspruch anwendungsorientierter Forschung ist folglich innerhalb der Realwissenschaften primär den Handlungswissenschaften unter Miteinbeziehung der Grundlagenwissenschaften zuzuordnen (vgl. Abbildung 1.1).

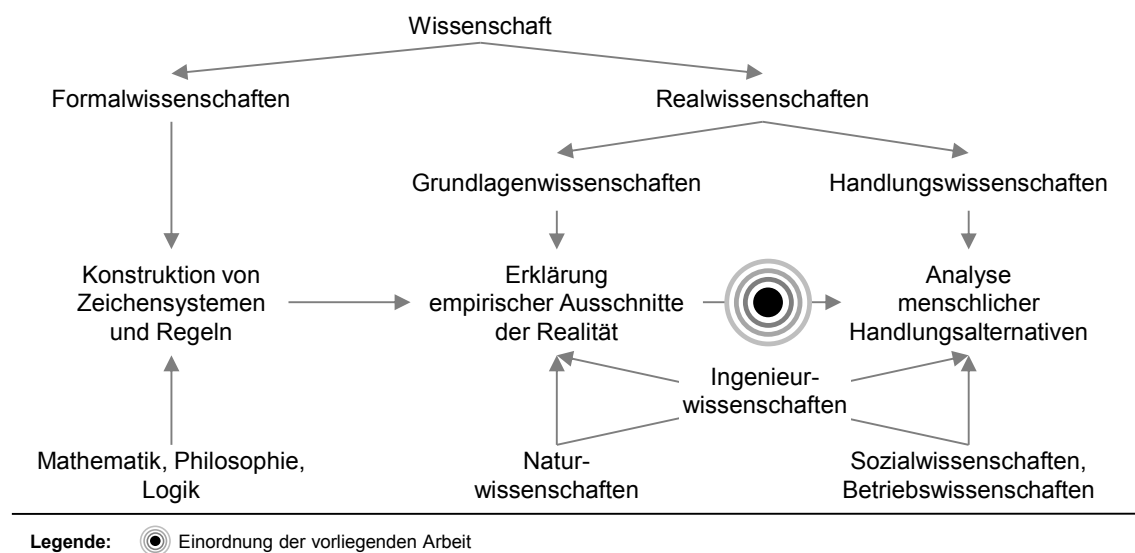


Abbildung 1.1: Einordnung der Arbeit in die Wissenschaftssystematik (in Anlehnung an ULRICH & HILL 1976, WEMHÖNER 2006, WESKAMP 2018, STEINHÄUßER 2019)

## 1.5 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit

In Bezug auf die vorstehend aufgeführte Einordnung in die Wissenschaftssystematik werden nachstehend die verwendete Forschungsmethodik sowie der Aufbau der vorliegenden Arbeit beschrieben. Die Forschungsmethodik beschreibt den Forschungsprozess und leitet sich aus den Merkmalen anwendungsorientierter Forschung ab, die im Folgenden aufgeführt sind (ULRICH 1982):

- Problemstellungen des gewählten Problemkontexts anwendungsorientierter Forschung haben ihren *Ursprung in der Praxis*.
- Die Betrachtung von Handlungsalternativen für den Menschen bedarf der *Interdisziplinarität* anwendungsorientierter Forschung, was durch die Synthese bestehenden Wissens unterschiedlicher Forschungsbereiche zu berücksichtigen ist.
- *Forschungsleitende Anforderungen* sollen zum einen als Orientierungshilfe während des Forschungsprozesses dienen und zum anderen für die Bewertung der Forschungsergebnisse verwendet werden.
- Anwendungsorientierte Forschung hat einen *präskriptiven Charakter* und zielt auf die Entwicklung von Handlungsalternativen ab.
- Anwendungsorientierte Forschung ist erfolgreich, wenn ihre Anwendung einen *Nutzen in der Praxis* schafft.

In Abbildung 1.2 wird der inhaltlich logische Zusammenhang zwischen den aufgeführten Merkmalen hergestellt, wodurch die Forschungsmethodik der vorliegenden Arbeit dargestellt wird.

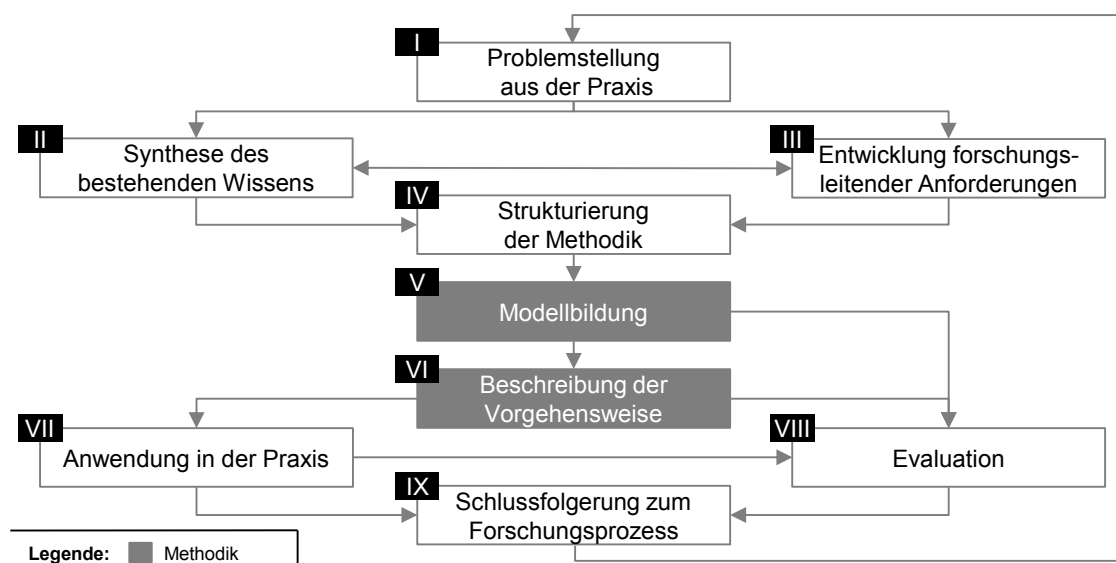


Abbildung 1.2: *Forschungsmethodik der vorliegenden Arbeit (in Anlehnung an STEINHÄUßER 2019 nach PLEHN 2017 und ULRICH 1982)*

Die vorliegende Arbeit setzt sich aus neun Kapiteln zusammen, in denen die Ergebnisse der Forschungsmethodik und des Forschungsprozesses dokumentiert werden. Abbildung 1.3 führt den Aufbau der Arbeit und die Zuordnung der Forschungsmethodik auf. Anschließend werden die Inhalte der Kapitel skizziert.



Abbildung 1.3: Aufbau der Arbeit und Zuordnung zur Forschungsmethodik

In Kapitel 1 wurden zunächst die Ausgangssituation sowie Motivation zum Problemkontext und zu der vorliegenden Problemstellung der industriellen Praxis aufgezeigt. Hieraus wurde die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit abgeleitet (I). Die Synthese des bestehenden Wissens erfolgt in Kapitel 2, das den Stand des Wissens hinsichtlich der Grundlagen und des Stands der Forschung betrachtet (II). In diesem Zusammenhang werden in den Grundlagen die Themenfelder Ganzheitliche Produktionssysteme und Digitalisierung in der Produktion beschrieben. Im Kontext der Integration digitaler Technologien in den Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme führt der Stand der Forschung Ansätze zur Integration digitaler Technologien, Ansätze zur Modellierung von Wertströmen sowie spezifische Ansätze der Wertstrommethode auf. Die Ableitung der Folgerungen aus den Grundlagen und des Handlungsbedarfs aus dem Stand der Forschung sowie die Entwicklung der forschungsleitenden Anforderungen werden parallel und iterativ zur Synthese des bestehenden Wissens durchgeführt. Diese Ergebnisse sind in Kapitel 3 beschrieben (III). Im Kapitel 4 erfolgt die Strukturierung der Methodik, indem ihre erforderlichen Komponenten abgeleitet und ihr Aufbau skizziert werden (IV). Die beiden nachfolgenden Kapitel stellen anhand

der Entwicklung der Methodik den präskriptiven Bestandteil des Forschungsprozesses dar. Hierbei führt Kapitel 5 die Modellbildung in Form des Strukturmodells zur Integration digitaler Technologien auf (V) und Kapitel 6 beschreibt die Vorgehensweise zur Integration digitaler Technologien (VI). Das Strukturmodell adressiert die Formalisierung informationsflussorientierter Wertströme, die informationsbezogene Gestaltung von Wertströmen und die Modellierung von Wirkzusammenhängen in Wertströmen, indem vorhandenes Wissen des Problemkontexts aggregiert, verdichtet und um neues Wissen angereichert wird. Auf das Strukturmodell wird im Rahmen der Vorgehensweise zurückgegriffen. Diese Vorgehensweise soll Anwender bei der Entwicklung und Bewertung von Handlungsalternativen unterstützen. Die Vorgehensweise zur Integration digitaler Technologien untergliedert sich hierbei in die konsekutiven Schritte der informationsflussorientierten Wertstromanalyse, des informationsflussorientierten Wertstromdesigns und der Bewertung der Integration digitaler Technologien. Die Anwendung der Methodik wird in Kapitel 7 beschrieben (VII). Aufbauend auf und begleitend zur Entwicklung der Methodik und ihrer Anwendung in der Praxis wird die Methodik in Kapitel 8 evaluiert. Die Evaluation erfolgt durch eine kritische Würdigung der entwickelten Methodik hinsichtlich technisch-wirtschaftlicher Aspekte und der forschungsleitenden Anforderungen (VIII). Kapitel 9 fasst die Arbeit und den Forschungsprozess zusammen, wobei weitere im Forschungsprozess identifizierte Handlungsbedarfe zukünftige Forschungsarbeiten motivieren sollen (IX).

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Überblick

Die Grundlagen und der Stand der Forschung werden, aufbauend auf der Ausgangssituation und Zielsetzung dieser Arbeit, im Kapitel 2 aufgeführt (vgl. Abbildung 2.1). In diesem Zusammenhang beschreiben die Abschnitte 2.2 und 2.3 die Grundlagen in Bezug auf den beschriebenen Problemkontext, wobei die Themenfelder Ganzheitliche Produktionssysteme und Digitalisierung in der Produktion adressiert werden. Des Weiteren wird in den Abschnitten 2.4, 2.5 und 2.6 der Stand der Forschung betrachtet und diskutiert. Der Stand der Forschung thematisiert Ansätze verschiedener Arbeiten und ordnet diese entsprechend ihrem Betrachtungsschwerpunkt der Integration digitaler Technologien (Abschnitt 2.4), der Modellierung von Wertströmen (Abschnitt 2.5) und der Wertstrommethode (Abschnitt 2.6) zu<sup>4</sup>.

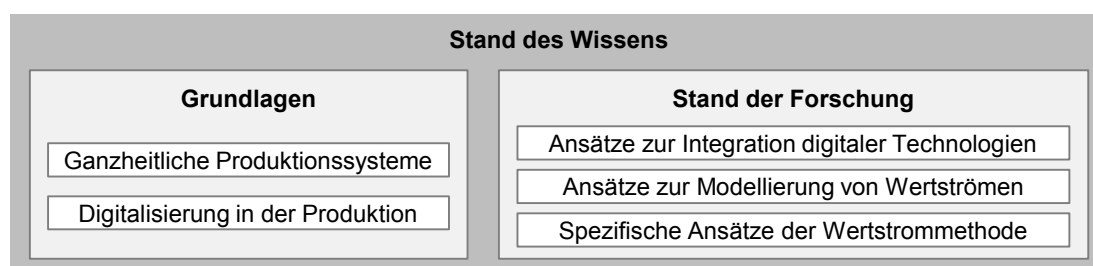


Abbildung 2.1: Betrachteter Stand des Wissens

## 2.2 Ganzheitliche Produktionssysteme

### 2.2.1 Allgemeines

Die Grundlagen zu Ganzheitlichen Produktionssystemen beschreiben zunächst den Bezugsrahmen hinsichtlich Produktionssystem, Produktionsprozesskette und Produktionsfaktoren. Danach werden die Eigenschaften Ganzheitlicher Produktionssysteme bezüglich ihrer Merkmale und Zielgrößen aufgeführt. Anschließend wird das Vorgehen zur Gestaltung Ganzheitlicher Produktionssysteme beschrieben, in welches sich die abschließend erläuterte Wertstrommethode einordnen lässt.

<sup>4</sup> Einige Arbeiten beschreiben Ansätze, die aufgrund ihres jeweiligen thematischen Fokus in mehreren Abschnitten des Stands der Forschung aufgeführt werden.

### 2.2.2 Bezugsrahmen und Merkmale

Ganzheitliche Produktionssysteme basieren mitunter auf den Ansätzen des Taylorismus sowie Fordismus und haben ihren Ursprung im Toyota-Produktionssystem sowie im Schlanken Produktionssystem<sup>5</sup> (KORGE & LENTES 2009, VDI 2870-1, DOMBROWSKI & MIELKE 2015A). Letzteres ebenso wie darauf aufbauende Ganzheitliche Produktionssysteme stellen ein wertschöpfungs- und wertstromorientiertes Leitbild für die Gestaltung, den Betrieb und die Weiterentwicklung der Produktionsabläufe eines Unternehmens dar (KORGE & LENTES 2009, VDI 2870-1, PAWELLEK 2014). Nachstehend wird zunächst der Bezugsrahmen zu Ganzheitlichen Produktionssystemen anhand der Begriffe Produktionssystem, Produktionsfaktoren und Produktionsprozessprozesskette beschrieben.

#### **Produktionssystem, Produktionsfaktoren und Produktionsprozesskette**

Diejenigen Unternehmensbereiche, in denen die Herstellung von Produkten und die Wertschöpfung durch das Ausführen von Prozessen erfolgen, werden als Produktion bezeichnet (VDI 2870-1). Eine Produktion mit ihren Prozessen ist in Form von einem Produktionssystem organisiert (DYCKHOFF 2003, SCHUH & SCHMIDT 2014). Hierbei repräsentiert ein Produktionssystem ein ganzheitliches Organisationskonzept (SCHUH & SCHMIDT 2014), das nach außen in Interaktion mit seiner Umwelt steht und nach innen Wertschöpfung an Produkten realisiert (DYCKHOFF 2003).

Ziel der Produktion ist es, in jedem Produktionsprozess durch Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten bzw. Ändern von Stoffeigenschaften fehlerfreie Produkte hervorzubringen und ausschließlich fehlerfreie Produkte an den nächsten Produktionsprozess weiterzugeben. Fehlerbehaftete Produkte werden als Ausschuss bezeichnet und sind aus Produktionsprozessen auszuschleusen (DIN 8580, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, WIENDAHL ET AL. 2014, SCHRÖDER & TOMANEK 2019). Werden in einer Produktion zur Herstellung von Produkten und Realisierung der Wertschöpfung mehrere Produktionsprozesse benötigt, so werden diese über Relationen wie Material- und Informationsfluss miteinander zu Produktionsprozessketten verknüpft (WIENDAHL 2011). Eine Produktionsprozesskette besteht somit aus mindestens zwei Produktionsprozessen, die entsprechend dem Kundentakt<sup>6</sup> mit Arbeitsinhalten auszufüllen sind. In Produktionsprozessen können neben wertschöpfenden

---

<sup>5</sup> Oftmals wird im deutschsprachigen Raum die englische Bezeichnung „Lean Production System“ verwendet, die KRAFCIK (1988) und WOMACK ET AL. (1990) initial geprägt haben (SHAH & WARD 2007).

<sup>6</sup> Der Kundentakt beschreibt die Zeit, in der ein vom Kunden gefordertes Produkt herzustellen ist, um den Kundenbedarf zu bedienen (DROSTE ET AL. 2015).



Prozessen auch unterstützende Prozesse wie beispielsweise Prüf- und Messvorgänge eingebunden sein (EVERSHEIM 1989).

In einem Produktionssystem werden durch die Prozesse einer Produktionsprozesskette materielle und immaterielle Elemente zu Produkten verarbeitet. Diese Elemente (z. B. Mensch, Maschine, Material, Methode, Milieu) werden als Produktionsfaktoren bezeichnet (DANGELMAIER 2009, VDI 2870-2). Diese lassen sich in Ressourcen und Informationen untergliedern (WIENDAHL ET AL. 2014, KRCCMAR 2015A, SCHINDLER 2015, KRÜGER ET AL. 2017), was in Abbildung 2.2 aufgeführt ist. Zu Maschinen sind technische Anlagen, Geräte, Einrichtungen sowie Werkzeuge zu zählen, die in einer Produktion zur Durchführung von Fertigungs- und Montageprozessen Verwendung finden (WIENDAHL ET AL. 2014). Während in Grundlagenwerken wie von GUTENBERG (1970) lediglich physische Ressourcen wie Mensch, Maschine sowie Material als Produktionsfaktoren bezeichnet sind und Informationen vielmehr als organisationsstützende Mittel verstanden werden (GUTENBERG 1970), hat sich die Wahrnehmung von Information als Produktionsfaktor erst über den Zeitverlauf entwickelt und gefestigt (BODE 1993, JÜNEMANN & BEYER 1998, NOESKE 1999, KRCCMAR 2015B, ENGELMANN & GROBMANN 2018). Der Produktionsfaktor Information ist für die heutige Produktion von fundamentaler Bedeutung (MOLENDEN ET AL. 2019).

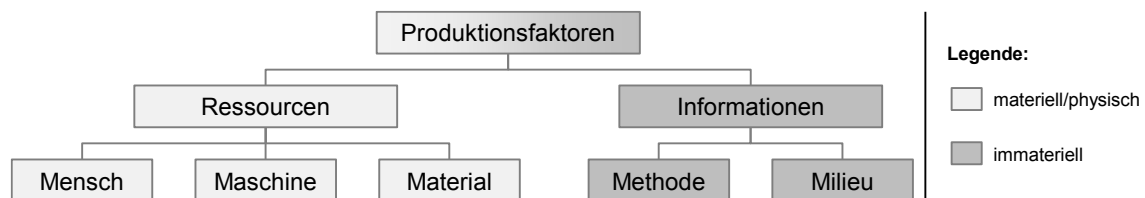


Abbildung 2.2: Produktionsfaktoren

Ein Produktionsprozess als Bestandteil einer Produktionsprozesskette repräsentiert ein technisches System. Agiert ein Mensch innerhalb eines Produktionsprozesses, so übt er als Systembestandteil Einfluss auf das soziotechnische System aus (VDI 4006-1), das sich aus technologischen, organisatorischen und personellen Teilsystemen zusammensetzt (RICE 1963, HIRSCH-KREINSEN 2015). In Produktionsprozessen verrichten Maschinen bzw. Menschen an Arbeitsstationen Fertigungs- oder Montagevorgänge für die Wertschöpfung von Produkten. Zwischen zwei Produktionsprozessen kann ein Puffer vorgesehen werden, um eine logistische Entkopplung einzelner Produktionsprozesse zu ermöglichen. Innerhalb eines Produktionsprozesses können Arbeitsstationen einfach oder seriell und gleich gestaltete Arbeitsstationen parallel angeordnet sein (SCHNELLBACH 2016), was in Abbildung 2.3 dargestellt ist. An einer

Arbeitsstation können mehrere Teilarbeitsvorgänge verrichtet werden, wobei sich ein Arbeitsvorgang aus mehreren Teilarbeitsvorgängen zusammensetzen kann.

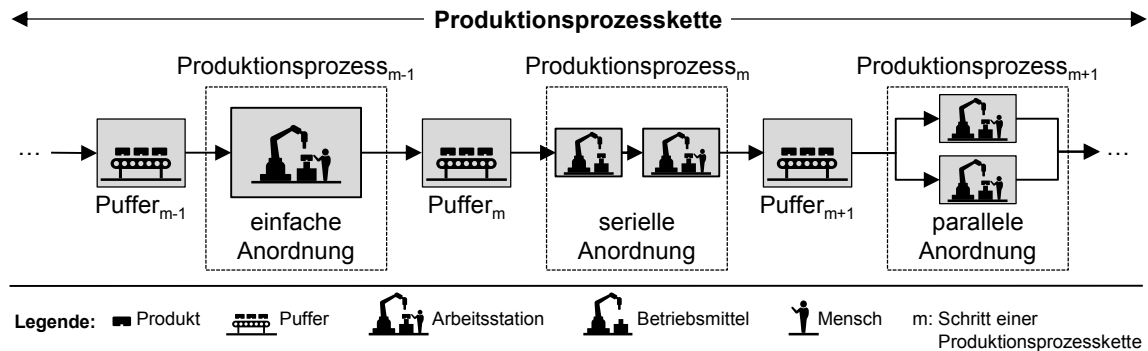


Abbildung 2.3: *Aufbau einer Produktionsprozesskette und Anordnungsmöglichkeiten der Arbeitsstationen von Produktionsprozessen (in Anlehnung an SCHNELLBACH 2016)*

Mit Fokus auf das produktionstechnische Umfeld sind die Unternehmensprozesse sowie die Produktionsprozessketten Ganzheitlicher Produktionssysteme am Kunden auszurichten, um die von der Unternehmensführung definierten Ziele zu erreichen (VDI 2870-1, UYGUN 2013). Zu den wesentlichen Merkmalen Ganzheitlicher Produktionssysteme und ihrer Produktionsprozessketten zählen die *Wertdefinition durch den Kunden*, die *Vermeidung von Verschwendung* und die *Produktion im Fluss* (KARIM & ARIF-UZ-ZAMAN 2013, BLEHER 2014, DOMBROWSKI ET AL. 2015, BECKER 2018, SEIFERMANN ET AL. 2018). Die Umsetzung dieser Merkmale soll der kontinuierlichen Verbesserung bestehender Prozesse dienen (BELLMANN 2016, BELLMANN & MEYER 2016). Die genannten Merkmale werden im Folgenden erläutert.

### Wertdefinition durch den Kunden

Prozesse, die aus Kundensicht einen Mehrwert an Produkten schaffen, werden als Wertschöpfung bezeichnet. Bei Prozessen, die Ressourcen verbrauchen, aber keinen Mehrwert am Produkt und für den Kunden schaffen, handelt es sich um Verschwendung (OHNO 2013, SCHMIDTCHEN & THEIL 2015, GOTTMANN 2016). Die Wertdefinition erfolgt sowohl durch externe als auch durch interne Kunden, deren Anforderungen durch effiziente und effektive Produktionsabläufe zufriedenzustellen sind (UYGUN 2013). In der Ganzheitlichen Produktion ist gemäß dem Pull-Prinzip darauf zu achten, dass die Prozesse der Leistungserstellung an den Kundenbedarfen ausgerichtet sind. Dadurch sollen Leistungen entlang der Wertschöpfungskette nur dann

erbracht werden, wenn stromabwärts entsprechende Kundenbedarfe vorliegen. Externe Kunden erheben Bedarf nach Produkten aus der Produktion, interne Kunden wie Produktionsprozesse erheben Bedarf nach den Erzeugnissen vorgelagerter Produktionsprozesse (VDI 2870-1, BHAMU & SANGWAN 2014). Neben den wertschöpfenden Prozessen in der Produktion existieren in der industriellen Praxis jedoch auch viele nicht-wertschöpfende Prozesse, die aus der Sicht externer und interner Kunden als Verschwendung interpretiert werden (KLEVERS 2009). Wertschöpfung ist zu erhöhen und Verschwendung zu vermeiden (ERLACH 2010, SCHMIDTCHEN & THEIL 2015, WIEGAND 2018).

### Vermeidung von Verschwendung

Die Vermeidung von Verschwendung ist eines der Hauptziele Ganzheitlicher Produktionssysteme (BLEHER 2014). Verschwendung ist der Verbrauch von Ressourcen ohne Wertsteigerung am Produkt (WOMACK & JONES 2013, SCHRÖDER & TOMANEK 2019). Liegt Verschwendung vor, lässt sich diese in der Regel nach den sieben in der Literatur aufgeführten Verschwendungsarten klassifizieren. Diese Verschwendungsarten werden für gewöhnlich nicht quantifiziert (EISELE 2018). Die sieben klassischen Verschwendungsarten sind zu differenzieren nach ihrem Auftreten und ihrem Ursprung. Zu den Verschwendungen, die im Produktionsprozess selbst auftreten können, zählen Fehler, ineffiziente oder unnötige Bewegungen, nicht anforderungsgerechte Überbearbeitung sowie Warten von Ressourcen. Die Verschwendungen Bestände, Transport und Überproduktion haben demgegenüber ihren Ursprung im Produktionsablauf (ERLACH 2010, OHNO 2013, BALS LIEMKE 2015). Die sieben klassischen Verschwendungsarten sind in Abbildung 2.4 zusammenfassend dargestellt.

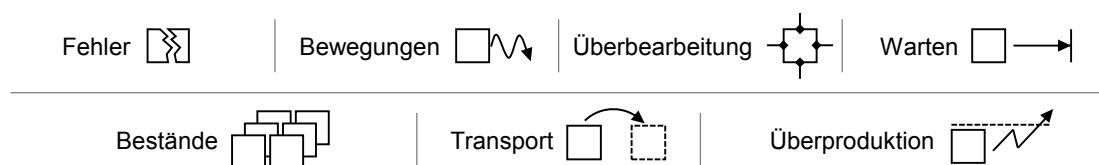


Abbildung 2.4: *Klassische Verschwendungsarten der Produktion (in Anlehnung an OHNO 2013, MAGENHEIMER 2014)*

### Produktion im Fluss

Mit einer Produktion im Fluss bzw. einer Fließproduktion wird entlang der gesamten Wertschöpfungskette ein turbulenzarmer, durchgängiger und schneller Wertstrom angestrebt, der sich aus Material- und Informationsfluss zusammensetzt (VDI 2870-1, DROSTE ET AL. 2015). Eine Fließproduktion kann aus mehreren Fließlinien mit

sequenziell angeordneten Produktionsprozessen bestehen. Die für die Herstellung unterschiedlicher Varianten von Produkten oder Produktfamilien erforderliche Prozessvarianz kann durch Rüstvorgänge an Ressourcen realisiert werden (STADTLER 2008).

Der Kunde legt durch die Nachfrage nach einem Produkt den Kundenbedarf für einen definierten Zeitrahmen fest. Durch den Quotienten aus der verfügbaren Arbeitszeit und dem Kundenbedarf lässt sich der Kundentakt (KT) ermitteln, was in Formel (2.1) aufgeführt ist (DROSTE ET AL. 2015, BRENNER 2016, LUGERT & WINKLER 2019A).

$$\text{Kundentakt (KT)} = \frac{\text{verfügbare Arbeitszeit in definiertem Zeitrahmen}}{\text{Kundenbedarf in definiertem Zeitrahmen}} \quad (2.1)$$

Der Kundentakt dient als Ausgangsbasis für eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Arbeitsumfänge auf arbeitsteilige sowie aufeinander abgestimmte Produktionsprozesse einer Produktionsprozesskette (DEUSE & BUSCH 2012, SEIBOLD ET AL. 2016, LUGERT & WINKLER 2019A). Die Dauer für die Durchführung der Arbeitsumfänge eines Produktionsprozesses soll unter der Dauer des Kundentakts liegen (DROSTE ET AL. 2015). Nach der Fertigstellung der Arbeitsumfänge eines Produktionsprozesses wird das Produkt unmittelbar an den nächsten Produktionsprozess einer Produktionsprozesskette im Sinne eines Einzelstückflusses weitergereicht (BRENNER 2016). Auch in einer kontinuierlichen Produktion im Fluss sind in der Regel Puffer vorgesehen, um Produktionsprozesse beispielsweise aufgrund von Losgrößenrestriktionen oder Schwankungen der Bearbeitungszeiten miteinander koppeln zu können (STADTLER 2008, DROSTE ET AL. 2015, BRENNER 2016).

### 2.2.3 Zielgrößen

Ziel Ganzheitlicher Produktionssysteme ist die Verbesserung von Produktionsabläufen und Wertströmen, indem Verschwendung vermieden wird (DOMBROWSKI ET AL. 2005). Um dieses Ziel zu operationalisieren und zu kontrollieren, eignet sich der Einsatz von Zielgrößen, welche die übergeordnete Zielsetzung Ganzheitlicher Produktionssysteme widerspiegeln (DOMBROWSKI ET AL. 2005). Zielgrößen sind Kennzahlen der hierarchisch höchsten Ebene und können zur Bewertung von Handlungsalternativen verwendet werden (GLADEN 2003). Kennzahlen drücken komplexe betriebliche Sachverhalte in einer Zahl einfach, knapp und relevant aus (GLADEN 2003, REICHMANN 2014) und setzen den quantifizierten Sachverhalt in einen zeitlichen Bezug (VDI 2893). Werden hierarchisch untergeordnete Kennzahlen verändert, so können die entsprechenden Zielgrößen beeinflusst (WEIGERT & ROSE 2011, GOTTMANN 2016) und dadurch übergeordnete Unternehmensziele adressiert werden. Zielgrößen

schaffen Transparenz hinsichtlich der Leistungsfähigkeit von Ganzheitlichen Produktionssystemen und hinsichtlich der Auswirkungen ergriffener Maßnahmen zur Verbesserung von Produktionsabläufen. Hierbei unterstützen die Zielgrößen beim Definieren von Zielen sowie der Erstellung von Prognosen und bieten Orientierungs- sowie Vergleichsmöglichkeiten zwischen alternativen Szenarien. Jedoch haben in der Regel mehrere Kennzahlen in einem Kontext zu stehen und ihre Einzelteile sowie ihre gegenseitigen Abhängigkeiten bekannt zu sein, um Produktionszustände umfassend beschreiben zu können (DÖRNHÖFER 2016, GOTTMANN 2016).

Übergeordnete Zielsetzung Ganzheitlicher Produktionssysteme ist es, fehlerfreie und individualisierbare Produkte bei möglichst kurzen Durchlaufzeiten und zu geringen Herstellkosten unmittelbar und rechtzeitig zu erzeugen (TÖPFER & GÜNTHER 2009, DIEKMANN 2017). In diesem Zusammenhang werden in verbreiteten Ansätzen die Zieldimensionen Geschwindigkeit, Wirtschaftlichkeit, Qualität und Flexibilität näher betrachtet (PETER 2009, ERLACH 2010, SCHNELLBACH 2016). Die den Zieldimensionen zugehörigen Zielgrößen Durchlaufzeit, Produktivitätsgrad, Qualitätsgrad und Every Part Every Interval eignen sich insbesondere zur Bewertung der Wertströme Ganzheitlicher Produktionssysteme (PETER & LANZA 2011, JONDRAL 2013, DROSTE ET AL. 2015, SCHNELLBACH 2016, SEIFERMANN ET AL. 2017, UNGERN-STERNBERG ET AL. 2019). Die Zieldimensionen und -größen sind in Abbildung 2.5 aufgeführt und werden nachstehend näher erläutert.

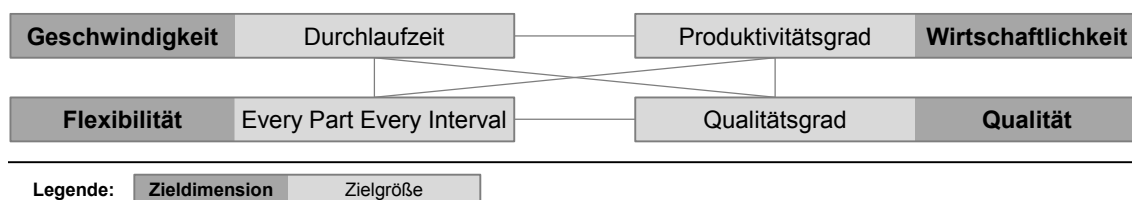


Abbildung 2.5: Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme (in Anlehnung an ERLACH 2010, DROSTE ET AL. 2015, SCHNELLBACH 2016)

### **Geschwindigkeit: Durchlaufzeit (DLZ)**

Die Durchlaufzeit ist die Zeitdauer von Beginn bis Ende eines Produktionsauftrags, in der alle Schritte einer Produktionsprozesskette durchgeführt werden. Hierbei sind sowohl die Rüst- und Bearbeitungszeiten als auch die Liege- und Transportzeiten zu berücksichtigen (WIENDAHL 2010), was in Abbildung 2.6 visualisiert ist. Die Durchlaufzeit (DLZ) eines Produktionsauftrags wird somit nach Formel (2.2) durch die Summe der einzelnen Durchlaufzeiten der Schritte einer Produktionsprozesskette ( $DLZ_i$ ) ermittelt.

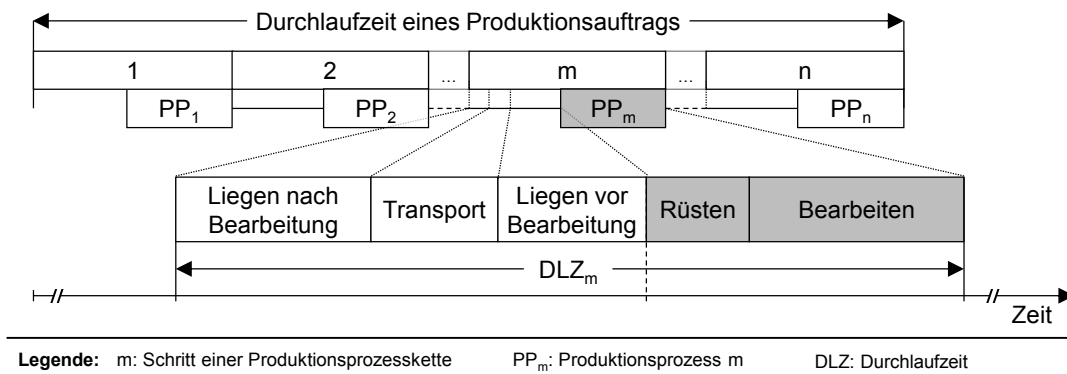


Abbildung 2.6: Durchlaufzeitanteile eines Produktionsauftrags (in Anlehnung an WIENDAHL 2010)

$$DLZ = \sum_{i=1}^n DLZ_i \quad (2.2)$$

mit	DLZ	Durchlaufzeit
	$DLZ_i$	Durchlaufzeit eines Schritts i
	i	Zählvariable
	n	Länge einer Produktionsprozesskette

Ziel ist es, eine möglichst kurze Durchlaufzeit von Produkten zu erreichen (SCHUH & SCHMIDT 2014), um insbesondere Bestände und dadurch gebundenes Kapital zu reduzieren (BRENNER 2016). Im Rahmen einer Fließproduktion gilt es daher, Liege- und Transportzeiten soweit wie möglich zu reduzieren, da diese mit keiner Wertschöpfung am Produkt verbunden sind und keinen Mehrwert aus Kundensicht darstellen. Durch die Durchlaufzeit selbst und das Verhältnis ihrer einzelnen Zeitanteile lassen sich Rückschlüsse auf Bestände und Reaktionsfähigkeit einer Produktionsprozesskette ziehen (PFEFFER 2014).

### Wirtschaftlichkeit: Produktivitätsgrad (PG)

Der Produktivitätsgrad (PG) eines Betrachtungsobjektes beschreibt in Bezug auf Produktionsprozesse den Grad an fehlerfrei hergestellten Produkten durch ein Produktionssystem im Verhältnis zur theoretisch möglichen Stückzahl innerhalb eines betrachteten Zeitrahmens (PETER 2009). Er lässt sich nach Formel (2.3) ermitteln.

$$PG = \frac{\text{Anzahl fehlerfrei hergestellter Produkte}}{\text{mögliche Stückzahl an Produkten}} \quad (2.3)$$

Mehrere Arbeiten quantifizieren den Produktivitätsgrad nach demselben Zusammenhang wie bei der Produktivitätskennzahl der Gesamtanlageneffektivität (OEE). Bei der OEE erfolgt jedoch eine Beschränkung auf die Produktivität technischer Betriebsmittel (FOCKE & STEINBECK 2018). Die Produktionsprozesse Ganzheitlicher Produktionssysteme umfassen neben technischen Betriebsmitteln auch Mitarbeiter zur Durchführung definierter Arbeitsumfänge (VDI 2870-1). Aufgrund desselben übergeordneten Zusammenhangs zwischen Produktivitätsgrad und Gesamtanlageneffektivität von Produktionsprozessen Ganzheitlicher Produktionssysteme kann die Bestimmung des Produktivitätsgrads vergleichbar wie die Bestimmung der Gesamtanlageneffektivität erfolgen, um zusätzliche mitarbeiterbezogene Einflüsse im Produktionsprozess mit berücksichtigen zu können (MAY 2007, PETER 2009).

Der Produktivitätsgrad setzt das Ideal eines absolut effektiven, ununterbrochen und fehlerfrei laufenden Produktionsprozesses in Relation zu den Verlustbereichen Verfügbarkeit, Leistung und Qualität (MAY & KOCH 2008). Der Produktivitätsgrad berechnet sich nach der Formel (2.4) aus dem Produkt von Verfügbarkeitsgrad (VG), Leistungsgrad (LG) und Qualitätsgrad (QG) (MAY & KOCH 2008, KLEVERS 2009, ERLACH 2010, FOCKE & STEINBECK 2018).

$$PG = VG \cdot LG \cdot QG \quad (2.4)$$

mit	PG	Produktivitätsgrad
	VG	Verfügbarkeitsgrad
	LG	Leistungsgrad
	QG	Qualitätsgrad

Ziel ist es, einen möglichst hohen Wert des Produktivitätsgrads zu erreichen, indem Verluste hinsichtlich Verfügbarkeit, Leistung und Qualität minimiert werden (MAY & KOCH 2008, PETER 2009). Die für die Ermittlung des Produktivitätsgrads relevanten Verluste sind in Abbildung 2.7 dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert.

Für die Bestimmung des Verfügbarkeitsgrads wird in der Regel die geplante Produktionszeit verwendet, die sich aus der täglich verfügbaren Arbeitszeit abzüglich der Zeiten für Wartung und Wartezeiten aufgrund fehlender Produktionsaufträge zusammensetzt. Auch sind Pausenzeiten kein Bestandteil der geplanten Produktionszeit, da es sich um vorgesehene Stillstandszeiten von Produktionsprozessen handelt (ERLACH 2010). In der Betriebszeit stellt ein Produktionsprozess Produkte her, ohne Verfügbarkeitsverluste aufgrund von technischen Störungen oder aufgrund von Anlauf- oder

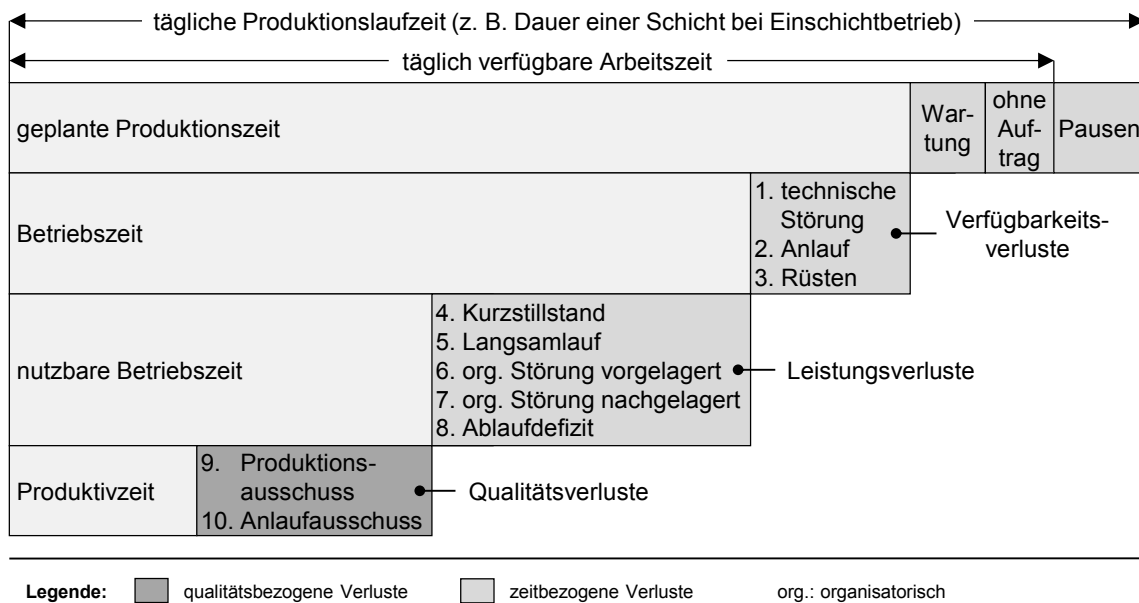


Abbildung 2.7: Bestandteile des Produktivitätsgrads eines Produktionsprozesses (in Anlehnung an PETER 2009, ERLACH 2010, MAY 2007, MAY & KOCH 2008, SCHNELLBACH 2016, STAUDER 2017)

Rüstvorgängen zu verzeichnen (MAY & KOCH 2008, STAUDER 2017). Der Verfügbarkeitsgrad berechnet sich entsprechend nach der Formel (2.5).

$$\text{Verfügbarkeitsgrad (VG)} = \frac{\text{Betriebszeit}}{\text{geplante Produktionszeit}} \quad (2.5)$$

Die nutzbare Betriebszeit ist die Betriebszeit abzüglich der Leistungsverluste durch Kurzstillstände, Langsamläufe, organisatorische Störungen oder Verzögerungen aufgrund von Ablaufdefiziten. Zu Kurzstillständen zählen kurze ungeplante Unterbrechungen in Produktionsprozessen (z. B. aufgrund eines verklemmten Werkstücks). Langsamläufe werden oftmals umgesetzt, um beispielsweise durch eine gedrosselte Prozess- oder Arbeitsgeschwindigkeit Ausschussraten zu reduzieren (MAY 2007, MAY & KOCH 2008). Leistungsverluste können aber auch Folge von einer unzureichenden Abstimmung innerhalb einer Produktionsprozesskette oder von Problemen in vor- oder nachgelagerten Produktionsprozessen sein, wenn beispielsweise nicht ausreichend Produkte aus dem vorgelagerten Produktionsprozess zugeführt werden oder fertig bearbeitete Produkte nicht in den nachgelagerten Produktionsprozess weitergereicht werden können. Leistungsverluste können darüber hinaus Folge von Ablaufdefiziten sein, da Mitarbeiter Prozesse unpassend gestalteter Abläufe durchführen und in dieser Zeit Betriebsmittel beispielsweise für die Bearbeitung des



nächsten Produkts bereits bestückt werden könnten. Folge von Ablaufdefiziten sind nicht-wertschöpfende Zeiten von Produktionsprozessen. Ablaufdefizite wirken folglich leistungsreduzierend (MAY 2007). Entsprechend lässt sich der Leistungsgrad mit der Formel (2.6) wie folgt bestimmen (MAY & KOCH 2008, ERLACH 2010).

$$\text{Leistungsgrad (LG)} = \frac{\text{nutzbare Betriebszeit}}{\text{Betriebszeit}} \quad (2.6)$$

Der Qualitätsgrad ist der dritte Faktor zur Berechnung des Produktivitätsgrads. Der Qualitätsgrad nimmt bei den Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme jedoch eine Sonderrolle ein, da er nicht nur als Faktor bzw. Kennzahl der Zielgröße Produktivitätsgrad, sondern selbst als eine Zielgröße fungiert.

### **Qualität: Qualitätsgrad (QG)**

Qualität ist der „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale (..) eines Objekts (..) Anforderungen (..) erfüllt“ (DIN EN ISO 9000). Die Qualitätsbetrachtung geht im Eigentlichen von der Produktqualität aus und gibt an, in welchem Maß ein Produkt die vom jeweiligen Kunden definierten Anforderungen und Erwartungen erfüllt. Neben der produktbezogenen Qualität erfolgt in der Produktion auch die Betrachtung der Qualität von Produktionsprozessen. Die Produktqualität kann von der Prozessqualität eines Produktionsprozesses abhängen (REINHART ET AL. 1996, SIHN ET AL. 2016).

Der Qualitätsgrad beschreibt den Anteil von fehlerfreien Produkten (KROPIK 2009) oder den Zeitanteil fehlerfrei durchgeführter Prozesse über das Verhältnis aus Produktivzeit und nutzbarer Betriebszeit. Dies lässt sich mit Formel (2.7) quantifizieren (ERLACH 2010).

$$\text{QG} = \frac{\text{hergestellte Produkte} - \text{Ausschuss}}{\text{hergestellte Produkte}} = \frac{\text{Produktivzeit}}{\text{nutzbare Betriebszeit}} \quad (2.7)$$

Ein hoher Qualitätsgrad eines Produktionsprozesses liegt vor, wenn er fehlerfreie Produkte hervorbringt, welche die definierten Anforderungen erfüllen (KAMISKE & BRAUER 2011). Durch das Vermeiden von Verlusten in Form von Produktionsausschuss sowie Anlaufausschuss, der beispielsweise Folge einer instabilen Qualitätsfähigkeit in der Anlaufphase von Betriebsmitteln sein kann, soll ein möglichst hoher Qualitätsgrad erreicht werden (ENKE ET AL. 2017, STAUDER 2017).

### **Flexibilität: Every Part Every Interval (EPEI)**

Zur Quantifizierung der Flexibilität eines Produktionsprozesses wird die Zielgröße Every Part Every Interval (EPEI) herangezogen. EPEI drückt die Dauer in Tagen aus, in der ein Produktionsprozess unter aktuellen Bedingungen alle Produktvarianten einmal produzieren kann (URNAUER ET AL. 2019). In diesem Zusammenhang werden diejenigen Produktvarianten berücksichtigt, die eine Produktionsprozessvarianz hervorrufen und bei denen Rüstprozesse erforderlich sind (GOTTMANN 2016). Für die Berechnung werden die Bearbeitungs-, Prozess- bzw. Rüstzeiten, die Prozessmengen aller Produktvarianten, die durchschnittlichen Losgrößen und die Anzahl an Betriebsmitteln verwendet, was in Formel (2.8) abgebildet ist (ERLACH 2010). Ziel ist es, einen geringen EPEI-Wert zu erhalten, um eine möglichst hohe Flexibilität sicherzustellen. Soll der EPEI-Wert zu einer Produktionsprozesskette bestimmt werden, so ist der Produktionsprozess mit dem höchsten EPEI-Wert für die Flexibilität der gesamten Produktionsprozesskette ausschlaggebend (KLETTI & SCHUMACHER 2014).

$$\text{EPEI} = \frac{\#PV \cdot (\text{LOS} \cdot \text{BZ} + \text{RZ})}{\#BM \cdot \text{VG} \cdot \text{LG} \cdot \text{PLZ}} = \frac{\#PV \cdot (\text{LOS} \cdot \frac{\text{PZ}}{\text{PM}} + \text{RZ})}{\#BM \cdot \text{VG} \cdot \text{LG} \cdot \text{PLZ}} \quad (2.8)$$

mit	EPEI	Every Part Every Interval
	#PV	Anzahl der Produktvarianten
	LOS	Durchschnittliche Losgröße
	BZ	Bearbeitungszeit pro Stück
	PZ	Prozesszeit
	PM	Prozessmenge
	RZ	Rüstzeit pro Rüstvorgang
	#BM	Anzahl Betriebsmittel
	VG	Verfügbarkeitsgrad
	LG	Leistungsgrad
	PLZ	Produktionslaufzeit

### **2.2.4 Vorgehen zur Gestaltung**

Bei der Einführung von Ganzheitlichen Produktionssystemen werden phasenorientierte Vorgehensweisen empfohlen, die den Einführungsablauf strukturieren und bedarfsorientiert an unternehmensspezifische Gegebenheiten und Notwendigkeiten anpassbar sind (SCHMIDT & ZAHN 2015, UNGERN-STERNBERG ET AL. 2019). Eine gängige phasenorientierte Vorgehensweise untergliedert den Einführungsablauf in die

vier Phasen *Konzeption*, *Pilotierung*, *Rollout* und *Betrieb* (VDI 2870-1, SCHMIDT & ZAHN 2015). In der Phase der Konzeption erfolgen die Definition des Zielzustands und die Festlegung des Geltungsbereichs der grundlegenden Merkmale, die in dem Ganzheitlichen Produktionssystem zu etablieren sind. In der konsekutiven Pilotierung sind Voraussetzungen für eine flächendeckende Umsetzung des Ganzheitlichen Produktionssystems in Form von definierten Maßnahmen zu schaffen. Diese Maßnahmen werden in der Regel in abgegrenzten Bereichen durchgeführt, bevor sie in der nachgelagerten Phase des Rollouts flächendeckend umgesetzt werden. In der Übergangsphase des Rollouts erfolgen die Überprüfung und etwaige bedarfsorientierte Anpassungen der definierten Ziele, basierend auf den Resultaten und Erfahrungen bisheriger Maßnahmen. In dieser Phase soll zudem der Übergang vom Projektcharakter der Einführung des Ganzheitlichen Produktionssystems hin zur Verankerung in der Aufbauorganisation erfolgen, sodass Weiterentwicklungen selbstständig und dezentral von lokalen Einheiten (z. B. Standorte, Abteilungen) kontinuierlich durchgeführt werden können. In der Phase des Betriebs sollen durch Vorgehensweisen zur Maßnahmenidentifikation und -umsetzung weitere Verbesserungen von Produktionsabläufen realisiert werden (VDI 2870-1, SCHMIDT & ZAHN 2015).

Durch systematische und regelmäßige Wertstrombetrachtungen können in der Phase des Betriebs durch die Wertstromanalyse Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert und Maßnahmen zu einer verbesserten Zielerreichung im Rahmen des Wertstromdesigns abgeleitet werden (SCHMIDT 2011, INTRA & ZAHN 2014, SCHMIDT & ZAHN 2015). Ein mittels Wertstromdesign entwickelter Soll-Wertstrom zeigt die konkreten Handlungsbedarfe zum analysierten Ist-Wertstrom aus der Wertstromanalyse auf (ERLACH 2010). In Abhängigkeit des Veränderungsumfangs, um einen Ist-Wertstrom in einen Soll-Wertstrom zu überführen, bedarf es der Umsetzung von entsprechenden Maßnahmen zur Verbesserung eines betrachteten Wertstroms (SCHMIDT & ZAHN 2015). Die Prozesse eines Ganzheitlichen Produktionssystems sind durch die schrittweise Optimierung bestehender Abläufe zu verbessern, was durch die Umsetzung von ermittelten Maßnahmen erfolgen kann. Durch diese schrittweise Realisierung von inkrementellen und aufeinander abgestimmten Maßnahmen soll auf den Inhalten und Ergebnissen der jeweils vorhergehenden Maßnahmen aufgebaut werden (WENGLER 2009, ZAHN ET AL. 2013, SCHMIDT & ZAHN 2015, HAMBACH 2019).

### **2.2.5 Wertstrommethode**

Die Wertstrommethode ist eine systematische, einfach durchführbare, nachvollziehbare und in produzierenden Unternehmen weit verbreitete Vorgehensweise, um

Wertströme zu untersuchen und zu gestalten. Fokus der Wertstrommethode ist die Reduktion von Verschwendung (HÄMMERLE & RALLY 2010, DAL FORNO ET AL. 2014, CONRAD & AUSILIO 2016, LUGERT ET AL. 2018). Hierbei umfasst der Wertstrom alle Material- und Informationsflüsse durch ein Produktionssystem, die für die Herstellung eines Produkts erforderlich sind (CHEN ET AL. 2010). In den beiden Schritten Wertstromanalyse und Wertstromdesign werden Verschwendungen in betrachteten Produktionsprozessketten eines Wertstroms identifiziert und Verbesserungspotenziale transparent gemacht (ERLACH 2010, LUGERT & WINKLER 2019A). Die Wertstromanalyse dient zur Erfassung, Visualisierung und Charakterisierung des ausgewählten Ist-Wertstroms. Hierbei wird das vorliegende Produktportfolio in Produktfamilien untergliedert. Diese werden über vergleichbare Produktionsprozesse hergestellt und entsprechende Kundenbedarfe zu den Produktfamilien sind zu ermitteln. Anschließend erfolgt in Produktionsrundgängen die Wertstromaufnahme (ERLACH 2010). Auf dieser Grundlage lässt sich der Wertstrom aufzeichnen und analysieren, um Verschwendung in Material- und Informationsflüssen aufzudecken (MEUDT ET AL. 2016B, LUGERT & WINKLER 2019A). Darauf aufbauend wird in dem konsekutiven Wertstromdesign ein kundenorientierter Soll-Wertstrom entwickelt, indem durch Anpassungen Verschwendung in den Prozessen reduziert bzw. vermieden wird (ERLACH 2010, LUGERT & WINKLER 2019A). Das Wertstromdesign legt demnach den Zielzustand des Wertstroms transparent dar, woraus sich Handlungsbedarfe für eine optimale Gestaltung von Material- und Informationsflüssen im Abgleich zwischen analysiertem Ist-Wertstrom und entwickeltem Soll-Wertstrom ableiten lassen (CONRAD & AUSILIO 2016, LUGERT & WINKLER 2019A). In der Vergangenheit wurden mehrere Ansätze zur Weiterentwicklung der Wertstrommethode veröffentlicht. Derzeit liegt aber Bedarf nach einer Weiterentwicklung der Wertstrommethode im Kontext der Digitalisierung vor (LUGERT ET AL. 2018). Die wesentlichen Eigenschaften der Wertstrommethode fasst Abbildung 2.8 zusammen.

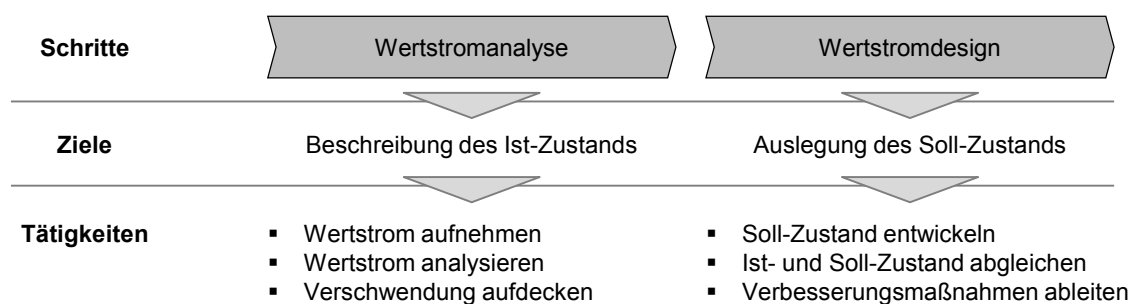


Abbildung 2.8: Übersicht zur Wertstrommethode (in Anlehnung an ERLACH 2010, ROTHER ET AL. 2015, LUGERT & WINKLER 2019A)

## **2.3 Digitalisierung in der Produktion**

### **2.3.1 Allgemeines**

Die Grundlagen zu Digitalisierung in der Produktion beginnen mit der Einführung grundlegender Begriffe bezüglich des Produktionsfaktors Information. Anschließend erfolgen die Definition, Einordnung und Beschreibung der Aufgaben digitaler Technologien im Kontext Produktion. Zudem wird hervorgehoben, wie digitale Technologien über Prozesse zur Handhabung von Daten und Informationen Einfluss auf Wertströme nehmen können.

### **2.3.2 Grundlegende Begriffe zu Information in der Produktion**

Nachstehend werden die grundlegenden Begriffe Information, Informationsfluss, Informationslogistik, Informationssystem und Informationsflussteilnehmer erläutert.

#### **Information**

Eine allgemeingültige Definition des Begriffs der Information ist nicht existent, da keine wissenschaftliche Theorie alle Aspekte informationsrelevanter Charakteristika vollumfänglich erfasst. Information ist kontextabhängig und wird entsprechend dem jeweils betrachteten Fachgebiet und Anwendungsbereich spezifisch definiert (KUTTLER 2008). Informationen sind neben Zeichen, Daten und Wissen Teil einer hierarchischen Struktur. Beginnend bei Zeichen werden durch Syntaxbildung Daten erzeugt. Wenn Daten um eine Semantik angereichert, in einen Kontext gesetzt oder interpretiert werden, so handelt es sich um Information. Durch die Aufbereitung bestehender Informationen können neue Informationen gewonnen werden. Die darauf aufbauende Vernetzung von Informationen schafft Wissen. Informationen sind demnach Daten, die einem Interpretationsvorgang unterzogen wurden und Eingangsgröße für einen oder Ausgangsgröße von einem wissensbasierten Entscheidungsprozess sind (AAMODT & NYGARD 1995, FUCHS-KITTOWSKI 2001, KRCCMAR 2015A, MEUDT ET AL. 2016A).

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Informationsbegriff aus der Perspektive des Fachgebietes und des Anwendungsbereichs der Produktion bzw. der betrieblichen Leistungserstellung materieller Güter betrachtet. Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, hat sich Information über die vergangenen Jahre neben physischen Produktionsfaktoren in der Wahrnehmung hin zu einem erforderlichen Produktionsfaktor entwickelt. Information ist ein auf Grundlage von Zeichen und Daten erzeugter oder aus Informationen abgeleiteter Produktionsfaktor, der für eine wirtschaftliche Realisierung von

Materialflüssen notwendig ist. In Bezug auf die Unterstützung von Materialflüssen durch den zielgerichteten Einsatz des Produktionsfaktors Information stehen im weiteren Verlauf der Arbeit Informationen, die aus Daten sowie anderen Informationen generiert werden können, im Fokus der Betrachtungen.

Während materielle Güter beim Durchlaufen eines Produktionsprozesses in bearbeiteter Form in das Produkt eingehen, werden Informationen als immaterielle, passive Güter verwendet, um die Durchführung und Aufrechterhaltung von Produktionsprozessen sicherzustellen (BODE 1993, KRCMAR 2015B). Hierbei besteht die Aufgabe von Information als dispositiver Faktor darin, die Vereinigung von Ressourcen zu einer produktiven Einheit zu unterstützen. Im Leistungserstellungsprozess sind die anforderungsgerechte Erzeugung, Verarbeitung, Weitergabe und Bereitstellung von Informationen zu gewährleisten (GUTENBERG 1970, BODE 1993). In Abhängigkeit vom jeweiligen Produkt und Produktionsprozess können Informationen Produktbestandteile werden (KRAUSE & GEBHARDT 2018). Der Wert von Informationen ist abhängig von zeitlichen und qualitativen Aspekten. Information ist kontextspezifisch und mit der notwendigen Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit einzusetzen (KRCMAR 2015B).

### **Informationsfluss**

Die Abläufe des Informationsflusses sind Prozesse, die Veränderungen von Informationen über Funktionen und Arbeitsoperationen bewirken können. Zu diesen Funktionen und Arbeitsoperationen zählen die Ein- und Ausgabe, der Transport, die Verarbeitung und Auswertung sowie das Speichern von Daten und Informationen (JÜNEMANN & BEYER 1998, KRÄMER 2002). Werden demnach gespeicherte Daten von einem Sender zu Empfängern, die diese Daten speichern und zu Informationen anreichern sowie Informationen verändern können, über räumliche Entfernungen einmalig, mehrmals oder kontinuierlich übermittelt bzw. übertragen, so wird dies als Informationsfluss bezeichnet (STEFFEN 2001). Bei Informationsflüssen lassen sich diese Vorgänge zur Erfassung, Verarbeitung und Verteilung von Informationen in Systemen entsprechend den prozesseitigen Rahmenbedingungen miteinander verketteten und mit dem Materialfluss zu einem Wertstrom koppeln (KRÄMER 2002). Zielsetzung von Informationsflüssen ist hierbei, das Planen, Steuern, Kontrollieren und Überwachen des Materialflusses zu ermöglichen (SCHMID 1999, PFOHL 2000).

Auf Basis eines durchgängigen Informationsflusses und einer engen Kopplung mit dem zu begleitenden Materialfluss lassen sich Durchlaufzeiten und Bestände reduzieren und zugleich Flexibilität bei einem volatilen Nachfrageverhalten realisieren, da unternehmensweit und auch unternehmensübergreifend Transparenz entlang des

Wertstroms geschaffen wird (JÜNEMANN & BEYER 1998, ERLACH 2010). Um die Wertschöpfung eines Produktes in den Prozessen des Materialflusses zeitlich und organisatorisch abzuwickeln, werden Informationsflüsse von der Informationslogistik gestaltet und orchestriert (DROSTE ET AL. 2015, KRCCMAR 2015B).

### **Informationslogistik**

Die Informationslogistik plant, verrichtet, steuert und überwacht den Fluss des Objekts Information (KRCCMAR 2015B, O'SHEA 2016). Prozesse des Informationsflusses führen zu systemischen Veränderungen von Informationen, indem deren Zustände unter gegebenen Zielsetzungen hinsichtlich Zusammensetzung, Ort, Menge, Qualität und Zeit verändert werden (KRÄMER 2002). Unter Berücksichtigung der Zielsetzung von Informationsflüssen ist die Informationslogistik zuständig für die Realisierung der Gesamtheit von Informationsflüssen, die über eine Betrachtungseinheit hinausgehen können (KRÄMER 2002, WINTER ET AL. 2008) und die diesen Betrachtungseinheiten für eine analytische Nutzung zur Verfügung gestellt werden (WINTER ET AL. 2008). Demnach werden in der Informationslogistik durch die Verkettung von Prozessen des Informationsflusses Informationen gewonnen, gespeichert, verarbeitet und verteilt (KRÄMER 2002) und diese Informationen zur Unterstützung von Entscheidungen verwendet (WINTER ET AL. 2008). Zielsetzung der Informationslogistik ist es, die Prozesse des Informationsflusses mit den richtigen Informationen in der richtigen Menge und Qualität, zum richtigen Zeitpunkt und am richtigen Ort sicherzustellen (KRCCMAR 2015B nach AUGUSTIN 1990). Die Informationslogistik stellt mit ihrer Zielsetzung Strukturierungsaspekte für die Gestaltung von Informationsflüssen bereit (KRCCMAR 2015B). In der Informationslogistik sind relevante Daten und Informationen zu handhaben und Informationsangebote zu stellen, um vorliegende Informationsbedarfe innerhalb einer Betrachtungseinheit zu befriedigen, unabhängig davon, ob diese in einer anderen Betrachtungseinheit entstanden sind oder nicht (WINTER ET AL. 2008).

### **Informationssystem**

Systeme zur Realisierung und Unterstützung von Prozessen des Informationsflusses und der Informationslogistik werden als Informationssysteme bezeichnet. Sie sind über ihre Einheiten mit den technischen Prozessen ihrer Umgebung verbunden (JÜNEMANN & BEYER 1998, KRCCMAR 2015B). Informationssysteme stellen soziotechnische Systeme dar, die sich aus menschlichen und maschinellen Teilsystemen zusammensetzen, und sie unterstützen bei der Sammlung, Speicherung, Übertragung, Verarbeitung, Bereitstellung und Nutzung von Daten und Informationen. Darüber hinaus

finden Informationssysteme Verwendung bei der Transformation von Daten und Informationen (KRCMAR 2015B). Informationssysteme sind dementsprechend technische und organisatorische Einrichtungen, welche der Regelung betriebsinterner sowie betriebsexterner Informationsflüsse dienen. Kernaufgabe ist es, alle Teilsysteme eines Informationssystems, die in Verbindung zu technischen Prozessen stehen, rechtzeitig mit den erforderlichen und relevanten Informationen unter wirtschaftlichen bzw. unter informationslogistischen Gesichtspunkten zu versorgen (JÜNEMANN & BEYER 1998, KRCMAR 2015B, HOFFMANN & HEIMES 2018, GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON 2019).

### Informationsflussteilnehmer

Produktionsrelevante Bestandteile von Informationssystemen, die an mit Materialflüssen gekoppelten Informationsflüssen teilnehmen, werden als Informationsflussteilnehmer definiert. Informationsflussteilnehmer eines Informationssystems können Menschen, Maschinen, Produkte oder sonstige Objekte sein.

Abbildung 2.9 stellt die Zusammenhänge zwischen Informationsfluss, Informationslogistik, Informationssystem und Informationsflussteilnehmern schematisch dar.

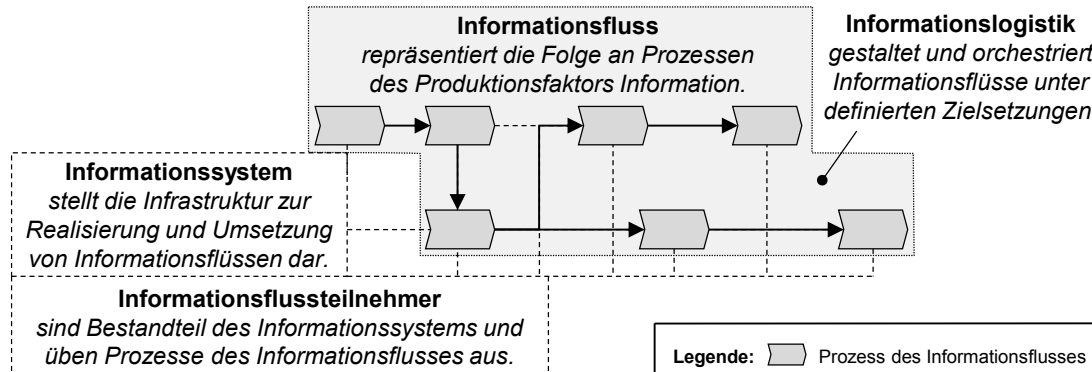


Abbildung 2.9: Übersicht zu Informationsfluss, Informationslogistik, Informationssystem und Informationsflussteilnehmer

### 2.3.3 Digitale Technologien: Definition, Einordnung und Aufgaben

Digitalisierung ist mittlerweile zum Schlüsselwort geworden, wenn die Transformation der Wertschöpfung in produzierenden Unternehmen thematisiert wird. Zu den Akteuren digitaler Prozesse zählen technische Systeme und der Mensch (FLEISCHMANN ET AL. 2018). Digitalisierung steht dabei stellvertretend für die Um-



wandlung und Darstellung von Informationen sowie die Transformation der Kommunikation weg von einem analogen hin zu einem digitalen Zusammenhang (GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON 2019). Beispielsweise werden Prozesse der Bereitstellung und Dokumentation produktionsrelevanter Informationen nicht mehr über papiergebundene Auftragszettel realisiert, sondern es erfolgen derartige Prozesse mithilfe von Tablets in digitaler Form.

Digitalisierung wird im Kontext der Produktion technologisch durch digitale Technologien realisiert. Aufgrund der kontextübergreifenden Verwendung des Begriffs in öffentlicher und wissenschaftlicher Literatur liegt ein heterogenes Verständnis zu digitalen Technologien vor (LIPSMEIER ET AL. 2018). LIPSMEIER ET AL. (2018) definieren digitale Technologien als Lösungen, die Wissen, Fähigkeiten und Know-how zusammenführen, um wertschöpfende Prozesse in der industriellen Praxis zu unterstützen. Digitale Technologien werden hierbei für das Generieren, Verarbeiten, Übertragen und Nutzen digitaler Daten und Informationen eingesetzt (LIPSMEIER ET AL. 2018). Entsprechend dieser Definition bedarf es bei der Realisierung von digitalen Ansätzen und Vorgehensweisen technologischer Infrastrukturen, geeigneter Architekturen (BAUERNHANSL 2017, KOLBERG ET AL. 2017A) sowie passender Technologieträger in Form von Hard- und Software (SPATH 2013, MÜLLER 2017). Digitale Technologien werden in der vorliegenden Arbeit als produktionsrelevante Technologien definiert, die den Produktionsfaktor Information digital handhaben können.

Die Leistungsfähigkeit von Technologieträgern für digitale Technologien obliegt einer starken Weiterentwicklung (BITKOM ET AL. 2015, DAIS 2017). Trotz einer inflationären Zunahme an Daten und Informationen lassen sich diese schneller handhaben, verarbeiten und für eine Vernetzung von Objekten nutzen. Beweggründe dieser Entwicklungen sind das exponentielle Wachstum von Rechenleistung und Speicherkapazität sowie die Weiter- oder Neuentwicklung von Technologieträgern. Zeitgleich sinken die Kosten der Technologieträger für digitale Technologien (KRCMAR 2015B, KAGERMANN 2017). Unter den genannten Gesichtspunkten ergeben sich durch die Verwendung digitaler Technologien und deren Kombination neue gesellschaftliche und ökonomische Anwendungspotenziale mit revolutionärem Charakter (BITKOM ET AL. 2015, HIRSCH-KREINSEN 2015, HANSCHKE 2018).

Synonym zu digitalen Technologien findet die Bezeichnung „Industrie 4.0-Technologien“ in verschiedenen Ansätzen Verwendung, um verstärkt den Bezug zur Produktion hervorzuheben (ROY 2017). Ein Kernziel der Industrie 4.0 ist es, den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien zur Unterstützung von Produktions- und Logistikabläufen weiter auszubauen, damit produzierende Unternehmen

ihre Wettbewerbsfähigkeit sicherstellen können (KAGERMANN ET AL. 2013, ROTH 2016). In der Industrie 4.0 sollen in Bezug auf die Produktion entlang der Wertschöpfungskette herzustellender Produkte alle erforderlichen Daten und Informationen in Echtzeit zur Verfügung stehen. Hierbei sind die an der Wertschöpfung beteiligten Objekte wie Menschen, Arbeitsstationen, Betriebsmittel, Lager, Puffer, Produkte und technische Systeme wertstromorientiert untereinander und mit den auszuführenden Prozessen zu vernetzen, wodurch ein zunehmend effizienter und effektiver werdender Einsatz der Ressourcen Mensch, Maschine und Material ermöglicht wird (BITKOM ET AL. 2015, VBW 2017, HARTLIEB ET AL. 2018). Die Vernetzung der an der Wertschöpfung beteiligten Ressourcen soll insbesondere die Effizienz und Effektivität der Produktion gegenüber ihrem Status quo erhöhen, indem vor allem Durchlaufzeiten, Bestände und Ausschuss reduziert sowie Auslastung, Flexibilität und Transparenz erhöht werden (MONOSTORI ET AL. 2016, ENKE ET AL. 2017, VBW 2017, AFFENZELLER ET AL. 2018, MUNDT ET AL. 2019). Hierbei sind sowohl die horizontale Vernetzung innerhalb der Wertschöpfungskette als auch die vertikale Vernetzung der für die Produktionsabläufe erforderlichen IT-Systeme zu fokussieren (OESTERREICH & TEUTEBERG 2016, HANSCHKE 2018). In der Industrie 4.0 wird in Produktionsprozessketten die durchgängige Kommunikation zwischen den Objekten und Ressourcen einer Produktion angestrebt (FLEISCHMANN ET AL. 2018, REINHART & BAUERNHANSL 2018).

Im Zusammenhang mit der Digitalisierung im produktionstechnischen Kontext hat sich die Worthülse Industrie 4.0 in den vergangenen Jahren zu einem methodischen Ansatz entwickelt (REINHART & BAUERNHANSL 2018), der den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien im Produktionsumfeld forciert (RAMSAUER 2013, OESTERREICH & TEUTEBERG 2016, RÖBLER & HASCHEMI 2017, GASSMANN ET AL. 2018). In Bezug auf Industrie 4.0 werden daher digitale Technologien in Form von produktionsrelevanten Informations- und Kommunikationstechnologien eingesetzt (RAMSAUER 2013), um durch veränderte Informationsflüsse den Wertschöpfungsanteil innerhalb von Wertschöpfungsketten zu erhöhen (WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016, POKORNI ET AL. 2017). Die exponentielle Weiterentwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglicht eine zunehmende horizontale Vernetzung von Wertströmen sowie die vertikale Vernetzung der IT-Infrastruktur für die Produktion (BAUERNHANSL 2017, DAIS 2017, KAUFMANN & FORSTNER 2017). Auf dem Shopfloor lassen sich durch den zielgerichteten Einsatz digitaler Technologien Systeme, Maschinen, Betriebsmittel, Materialien und Menschen für eine Fokussierung des Wertstroms miteinander vernetzen, wodurch Verschwendung reduziert und vermieden werden kann (POKORNI ET AL. 2017, HOELLTHALER ET AL. 2020). In

der vorliegenden Arbeit wird folglich ein synonymes Verständnis von digitalen Technologien und produktionsrelevanten Informations- und Kommunikationstechnologien zugrunde gelegt.

### **2.3.4 Informationsflussorientierter Einsatz digitaler Technologien**

In der digitalen Transformation werden sukzessiv neue und weiterentwickelte digitale Technologien für den Umgang mit Daten und Informationen sowie für eine digitale Kommunikation hervorgebracht (ROBRA-BRISSANZ & SIEMON 2019). Digitalisierung und die mit ihr verbundene Weiterentwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologien sind externe Wandlungstreiber für Produktionssysteme (WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016) und industrielle Produktionstechnologien (VBW 2017). Werden Informations- und Kommunikationstechnologien bewusst in den Prozessen und Strukturen der innerbetrieblichen Produktion integriert, so werden diese internen Veränderungen als Digitalisierung der Produktion bezeichnet (KOLBERG 2018). Durch den Einsatz digitaler Technologien in der Produktion erfolgt eine Verknüpfung von Informations- und Kommunikationstechnologien mit Produktionstechnologien. Bei der Integration digitaler Technologien in der Produktion sind insbesondere ausgereifte digitale Technologien mit einer hohen Leistungsfähigkeit einzusetzen, die Differenzierungspotenzial für die Realisierung von Wettbewerbsvorteilen bieten (AMBERG ET AL. 2011, GASSMANN ET AL. 2018, GOCHERMANN 2020, KIRCHNER 2020 nach GANSCHAR ET AL. 2013). Digitale Technologien, die zur Unterstützung von Prozessen in der Produktion eingesetzt und als Teil eines Informationssystems integriert werden, entfalten ihre Wirkung durch das Verändern wertschöpfender Prozesse (JACOBI & LANDHERR 2013, MATZLER ET AL. 2018). Dadurch lassen sich interne Veränderungen der Prozesse von Wertströmen bewirken. Dabei werden Effekte auf Materialflüsse indirekt erzielt, indem die Prozesse des Informationsflusses durch die Integration digitaler Technologien verändert werden können (MEUDT ET AL. 2017B, KOLBERG 2018). Folglich beeinflussen veränderte Prozesse des Informationsflusses die mit ihnen gekoppelten Prozesse des Materialflusses (MEUDT ET AL. 2017B). Digitale Technologien können in diesem Zusammenhang zur Gestaltung, Steuerung und Überwachung von Informationsflüssen eingesetzt werden. Hierbei werden die Handhabung und der Einsatz des Produktionsfaktors Information als Befähiger für effektive und effiziente Prozesse des Materialflusses interpretiert (BAUERNHANSL ET AL. 2018).

Digitale Technologien können folglich durch das Verändern von Informationsflüssen zum Planen, Steuern, Kontrollieren und Überwachen von Materialflüssen eingesetzt

werden. Durch digitale Technologien lassen sich die Wertströme Ganzheitlicher Produktionssysteme gezielt beeinflussen und gestalten (DOMBROWSKI ET AL. 2017A). Digitalisierung in der Produktion stellt somit Mittel und Werkzeuge zur Verfügung, die Informationsflüsse prozessorientiert verändern können. Hierdurch sollen ausgehend von veränderten Informationsflüssen die Abläufe von Produktionsprozessketten verbessert und deren Wertschöpfung erhöht werden können (MEUDT ET AL. 2017B, WEBER ET AL. 2018, KIRCHNER 2020).

Während der Stand des Wissens mit den Abschnitten 2.2 und 2.3 die Grundlagen behandelt, gehen die Abschnitte 2.4, 2.5 und 2.6 auf den Stand der Forschung ein. In diesem Rahmen werden Ansätze zur Integration digitaler Technologien, Ansätze zur Modellierung von Wertströmen und Ansätze der Wertstrommethode erläutert.

## **2.4 Ansätze zur Integration digitaler Technologien**

### **2.4.1 Allgemeines**

Digitale Technologien für die Produktion sind keine statischen Produkte, sondern sie unterliegen zum einen einer kontinuierlichen Weiterentwicklung und zum anderen hängt ihre Leistungsfähigkeit stark von ihrer jeweiligen Integration in die jeweilige Produktionsprozesslandschaft ab. Um sowohl aktuelle als auch zukünftig entstehende Technologien beschreiben zu können, eignet sich die Beschreibung anhand von Eigenschaften. Neben der Beschreibung anhand von Eigenschaften digitaler Technologien sollen diese aber auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf Prozesse beurteilt werden können. In Bezug auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit werden deshalb im Folgenden eigenschaftsbasierte und prozessorientierte Ansätze zur Integration digitaler Technologien erörtert.

### **2.4.2 Eigenschaftsbasierte Ansätze**

Zur Bewertung von Anwendbarkeit und Eignung digitaler Technologien für produzierende Unternehmen existieren reifegradbasierte Ansätze. Beispielsweise lassen sich technische Reifegrade von Industrie 4.0-Technologien (BISCHOFF ET AL. 2015), Industrie 4.0-Evolutionsstufen (ABELE ET AL. 2015), der Industrie 4.0-Reifegrad von Funktionsbereichen, Ressourcen, Informationssystemen, Strategie, Produkten oder dem ganzen Unternehmen (SCHUMACHER ET AL. 2016, SCHUH ET AL. 2017) sowie der unternehmensspezifische Industrie 4.0-Reifegrad über einen Benchmark

(LICHTBLAU ET AL. 2015, BOGNER ET AL. 2016, KNOSPE ET AL. 2018) ermitteln. Darüber hinaus existieren Ansätze, die den Reifegrad hinsichtlich Industrie 4.0 und den Strukturen Ganzheitlicher Produktionssysteme im Rahmen einer kombinierten Betrachtung ermitteln (POKORNI ET AL. 2017, RÖBLER & HASCHEMI 2017, BAUER ET AL. 2019). In einem weiteren reifegradbasierten Ansatz beschreiben UNGERN-STERNBERG ET AL. (2019) eine zielgrößenorientierte Methode, um Industrie 4.0-Lösungen in bestehende Ganzheitliche Produktionssysteme im Sinne einer digital vernetzten Produktion zu integrieren. Die Reifegradbeurteilung erfolgt auf Produktionssystemebene, indem anhand allgemeiner Zielgrößen und daraus abgeleiteter mitarbeiterzentrierter Zielgrößen der Ist-Reifegrad ermittelt und der gewünschte Soll-Reifegrad entwickelt wird. Abschließend erfolgen anhand einer Nutzwertanalyse der Vergleich der Lösungen mit einer hohen industriellen Einsatzreife und die Auswahl einer präferierten Lösung (UNGERN-STERNBERG ET AL. 2019). Die reifegradbasierten Ansätze ermöglichen die jeweiligen Klassifikationen digitaler Technologien auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen und in unterschiedlichen Abstraktionsgraden. Sie ermöglichen kontextspezifische Abschätzungen hinsichtlich des betrachteten Status quo sowie des Aufdeckens möglicher Handlungsfelder. Fragestellungen hinsichtlich detaillierter Vorgaben, wo und wie digitale Technologien integriert werden müssen, um einen wertstrombezogenen Nutzen zu generieren, werden nicht beantwortet.

ZÜHLKE (2008) führt anhand beispielhafter Funktionalitäten wie Datenübertragung oder Datenspeicherung auf, dass durch einen serviceorientierten Einsatz digitaler Technologien entlang der Automatisierungspyramide Wertschöpfungspotenziale realisiert werden können (ZÜHLKE 2008). Wie die Integration digitaler Technologien spezifisch zu erfolgen hat, wird nicht näher beschrieben.

DOMBROWSKI ET AL. (2017A) differenzieren bei der Strukturierung von Industrie 4.0-Elementen nach den Ebenen prozessorientierte Eigenschaften, Systeme und Technologien der Industrie 4.0. Basierend auf einer Analyse von Anwendungsfällen werden vordefinierte Kategorien zu diesen Ebenen ermittelt (DOMBROWSKI ET AL. 2017A). Diese Kategorien sind als nicht abgeschlossen zu bewerten, sodass zukünftige Technologien neue Kategorien aufwerfen können.

LANGLOTZ & AURICH (2019) führen sechs Industrie 4.0-Cluster ein. Diese Cluster erheben den Anspruch zeitunabhängig formuliert zu sein, damit ihnen aktuelle ebenso wie weiterentwickelte und neu entstehende Industrie 4.0-Technologien zugeordnet werden können. Darüber hinaus wird eine Kategorisierung vorgestellt, die spezifische Industrie 4.0-Technologien in Relation zu Prinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme und Anwendungsbereichen in der Produktion setzt (LANGLOTZ & AURICH

2019). Dieser Ansatz stellt den allgemeinen Bezug zwischen Industrie 4.0-Clustern, denen digitale Technologien zugeordnet werden können, und Prinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme sowie ihren Anwendungsbereichen her. Dies erfolgt jedoch nicht im unternehmensspezifischen Kontext.

SIEDLER ET AL. (2019B) entwerfen eine Technologiekarte, die digitale Technologien hinsichtlich identifizierter Technologietrends kategorisiert und definierten Anwendungsszenarien zuordnet (z. B. Vernetzung entlang der Wertschöpfungskette). Darauf aufbauend erfolgen die Zuordnung zu Implementierungsbereichen wie Fertigung, Montage oder Logistik sowie eine Einschätzung von Auswirkungen auf die Prozesse, die vom Menschen ausgeübt werden. Über diesen vierstufigen Filterprozess können Profile digitaler Technologien entworfen werden (SIEDLER ET AL. 2019B). Die definierten Anwendungsszenarien und Auswirkungen auf den Menschen führen zu einer Einschränkung des Betrachtungsraums, wodurch keine gesamtheitliche Lösungsfindung für die Integration digitaler Technologien realisiert werden kann.

BITSCH (2019) betrachtet im Rahmen eines digitalen Shopfloor-Managements die Datenerfassung und -verarbeitung sowie die Informationsdarstellung. In Abhängigkeit der vorliegenden Datenstruktur können Daten strukturiert, teilstrukturiert oder unstrukturiert gespeichert werden (BITSCH 2019). Neben dem Ansatz von BITSCH (2019) existieren weitere spezifische Klassifikationen. WÖLFLE (2014) fokussiert beispielsweise die Gestaltung von Arbeitsassistenzsystemen für den Bereich der Intralogistik und behandelt hierbei die Auslegung derer Funktionalitäten hinsichtlich Datenerfassung, Datenverarbeitung und Informationsbereitstellung (WÖLFLE 2014). Durch diese beiden Ansätze werden shopfloornahe Klassifizierungen gegeben. Jedoch wird eine Beschreibung von digitalen Technologien im Zusammenhang mit Prozessen der Auftragsabwicklung erschwert (z. B. Enterprise Resource Planning-System (ERP-System) oder Manufacturing Execution System (MES)).

BAYER ET AL. (2020) fokussieren im Kontext von Digitalisierung und Industrie 4.0 den Teilbereich digitaler Assistenzsysteme, deren Funktionen aus den Unterkategorien sensorische und kognitive Assistenz die Arbeit des Menschen in der Produktion unterstützen können. Die insgesamt acht Funktionen hinsichtlich Wahrnehmung, Handlungsanweisung und Analyse werden näher beschrieben und in einem morphologischen Kasten weiter spezifiziert. Durch die entwickelte Klassifikation sollen Einführungen oder Erweiterungen digitaler Assistenzsysteme unterstützt werden (BAYER ET AL. 2020). Durch die Fokussierung auf digitale Assistenzsysteme wird nur eine Teilmenge digitaler Technologien betrachtet, wodurch diese Funktionen die Fä-

higkeiten digitaler Assistenzsysteme gut widerspiegeln, diese Funktionen jedoch der Übertragbarkeit auf die Gesamtheit digitaler Technologien entgegenstehen.

LIPSMEIER ET AL. (2018) entwickeln ein Klassifikationsschema, um digitale Technologien hinsichtlich Funktionen, Informationsquelle und -ziel sowie Transformationsarten zu charakterisieren. Hierbei unterscheiden die Funktionen nach dem Generieren, Verarbeiten, Übertragen und Nutzen von digitalen Daten. Informationsquellen und -ziele können Menschen sowie physische oder digitale Objekte bzw. Systeme sein. Falls eine Transformation von Information vorliegt, wird in diesem Zusammenhang nach Zeit, Ort und Zustand differenziert (LIPSMEIER ET AL. 2018). Das Klassifikationsschema dieses Ansatzes legt in Form von Funktionen und Transformationsarten grundlegende Fähigkeiten digitaler Technologien dar. Durch die Beschreibung von Informationsquelle und -ziel erfolgt jedoch eine Einschränkung des Betrachtungsraums der zu berücksichtigenden digitalen Technologien.

Die vorstehend beschriebenen Ansätze führen jeweils spezifische Möglichkeiten der eigenschaftsbasierten Beschreibung digitaler Technologien auf. Es bestehen in Bezug auf den jeweiligen Kontext jedoch Einschränkungen hinsichtlich der Allgemeingültigkeit oder der Vollständigkeit produktionsrelevanter digitaler Technologien, wodurch sich diese Ansätze nur unzureichend zur Integration digitaler Technologien eignen.

### 2.4.3 Prozessorientierte Ansätze

SIEDLER ET AL. (2019A) identifizieren in ihrem Ansatz Abhängigkeiten zwischen einzelnen digitalen Technologien, deren Einsatz die Effizienz und Flexibilität von Produktionsprozessen unterstützen soll. Hierfür werden aktuell eingesetzte sowie zukünftig einzusetzende digitale Technologien in einer Einflussmatrix hinsichtlich erforderlicher Integrationsvoraussetzungen beurteilt. Anschließend werden die qualitativen Auswirkungen zwischen digitalen Technologien von identisch bis gegensätzlich ermittelt, ehe ihre Einsatzmöglichkeiten in einzelnen Produktionsprozessen eines Produktionssystems mit einer Multiple-Domain-Matrix definiert werden (SIEDLER ET AL. 2019A). Dieser Ansatz dient der Identifikation von Einsatzmöglichkeiten digitaler Technologien, jedoch werden weder spezifische Integrationsvorgaben in Prozessen erarbeitet noch übergeordnete Auswirkungen auf das Produktionssystem ermittelt.

Mit dem Ansatz von DOMBROWSKI ET AL. (2018A) lassen sich Industrie 4.0-Technologien identifizieren, die zur Behebung von Problemen in Produktionsprozessen oder

Puffern eingesetzt werden können. Hierzu werden auf Grundlage eines Ursache-Wirkungs-Diagramms zunächst die Ursachen eines betrachteten Problems aus den Kategorien Mensch, Milieu, Methode, Material und Maschine ermittelt. Anschließend erfolgt die Lösungsfindung mit Prozessbeteiligten und Technologieexperten, indem zu diesen Kategorien Verbesserungen durch den Einsatz von Industrie 4.0-Technologien erarbeitet werden. Anschließend werden die erarbeiteten Verbesserungsmöglichkeiten hinsichtlich der Zielgrößen Qualität, Zeit und Kosten einer Nutzwertanalyse unterzogen. Abschließend wird die Machbarkeit der Technologieintegration abgeschätzt (DOMBROWSKI ET AL. 2018A). Der Ansatz bietet eine strukturierte Vorgehensweise, um Industrie 4.0-Technologien zur Problembehebung zu ermitteln. Die Probleme werden allerdings auf Ebene einer übergeordneten Produktionsprozessbeschreibung formuliert, sodass ein konkreter Einsatz zur Unterstützung von Teilprozessen nicht abgeleitet werden kann.

LIPSMEIER ET AL. (2018) beschreiben neben der Charakterisierung digitaler Technologien allgemeine Leistungskategorien zu Wertschöpfungsprozessen. In Bezug auf die Wertschöpfungsprozesse der Produktion soll der Nutzen betrachteter digitaler Technologien hinsichtlich der Bereiche Produktionseffizienz, -effektivität und -flexibilität anhand definierter Kennzahlen abgeschätzt werden (LIPSMEIER ET AL. 2018). Wie sich digitale Technologien im Detail auf die Produktionsprozesse auswirken können, wird nicht näher untersucht.

KELLER ET AL. (2019) führen dieselben Funktionen digitaler Assistenzsysteme wie BAYER ET AL. (2020) auf und quantifizieren über ihre Effekte auf Mitarbeiter die Auswirkungen auf die Effizienz von Produktionsprozessen. Hierfür werden mitarbeiter- und prozessbezogene Kennzahlen entwickelt und darauf aufbauend Kausalzusammenhänge zwischen den Funktionen, den Effekten auf Mitarbeiter und den definierten Kennzahlen von Produktionsprozessen über Hypothesen formuliert und verifiziert (KELLER ET AL. 2019). In diesem Ansatz erfolgt durch die Fokussierung auf digitale Assistenzsysteme eine Einschränkung des Betrachtungsraums, was die Übertragbarkeit des Ansatzes auf die Gesamtheit digitaler Technologien erschwert.

Die prozessorientierten Ansätze zur Integration digitaler Technologien nehmen Bezug auf übergeordnete prozessuale Zusammenhänge oder sind in ihrem Betrachtungshorizont auf ein spezifisches Prozessspektrum eingeschränkt. Sie ermöglichen keine detaillierte und zugleich umfassende prozessuale Beschreibung digitaler Technologien in Bezug auf Prozesse des Informationsflusses in einem produktionsbezogenen Informationssystem.



## **2.5 Ansätze zur Modellierung von Wertströmen**

### **2.5.1 Allgemeines**

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Verbesserung von Wertströmen, indem Informationsflüsse zielgerichtet verändert werden. Digitale Technologien stellen hierbei Werkzeuge dar, um Informationsflüsse zu gestalten. Ein notwendiger Schritt, um Transparenz in Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme zu schaffen, ist die Modellierung der Prozesse von Material- und Informationsflüssen, deren Elemente gegenseitig aufeinander einwirken können. Im Stand der Forschung zur Modellierung von Wertströmen werden daher Ansätze zur Abbildung von Material- und Informationsflüssen sowie zur Modellierung von Wirkzusammenhängen erörtert.

### **2.5.2 Ansätze zur Abbildung von Material- und Informationsflüssen**

Material- und Informationsflüsse können auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen modelliert werden. Betrachtungen mit Schwerpunkt auf Themen rund um Supply Chain wie beispielsweise von STEFFEN (2001), KRUPPE (2007), WERNER (2017) oder KHAN & YU (2019) fokussieren die Modellierung zwischenbetrieblicher oder überbetrieblicher Material- bzw. Informationsflüsse. Innerbetriebliche Material- und Informationsflüsse werden hier in der Regel nicht detailliert modelliert. In Bezug auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit haben die im Folgenden aufgeführten Ansätze einen innerbetrieblich orientierten Betrachtungsschwerpunkt.

GOLDSTEIN (1999) entwickelt ein Vorgehensmodell zur Geschäftsprozessgestaltung, das mitunter die Schritte Prozessfassung, -abbildung, -analyse, -bewertung und -gestaltung beschreibt. Eine Übertragbarkeit auf andere Unternehmensbereiche wird aufgeführt (GOLDSTEIN 1999), jedoch wird nicht näher beschrieben, wie Material- und Informationsflüsse mit dem Vorgehensmodell zu behandeln sind.

Im Rahmen einer verschwendungsfokussierten Prozessmodellierung bildet MAGENHEIMER (2014) die Prozessketten des Informationsflusses indirekter Bereiche in sogenannten Swimlanes ab. Die einzelnen Swimlanes repräsentieren mitunter Verantwortlichkeiten, organisatorische Einheiten und die innerbetrieblichen Prozessketten des Informationsflusses von Lieferant bis Kunde. Hierbei werden Durchlaufzeiten und eingesetzte Dokumente, Datenträger oder Softwaresysteme prozessbezogen aufgeführt (REINHART ET AL. 2012, MAGENHEIMER 2014, MAGENHEIMER ET AL. 2014). Innerbetriebliche Materialflüsse werden nicht abgebildet.

Um sowohl innerbetriebliche Material- als auch innerbetriebliche Informationsflüsse abzubilden, hat sich die Modellierung gemäß der Wertstrommethode in der produzierenden Industrie etabliert (HÄMMERLE & RALLY 2010). ROTHER & SHOOK (2009)<sup>7</sup> haben mit der Wertstrommethode eine Visualisierung zur Beschreibung von Produktionsprozessen und deren logistischen Verknüpfungen entwickelt (ROTHER & SHOOK 2009). ERLACH (2010) erweitert die bis dato bekannte Formalisierung um weitere Prozessgrößen sowie Symbole zur Wertstromanalyse und zum Wertstromdesign und ergänzt Visualisierungsmöglichkeiten hinsichtlich des Informationsflusses. Die Informationsflüsse konzentrieren sich hierbei auf die qualitative Abbildung von Geschäftsprozessen der Auftragsabwicklung, um die für die Planung und Steuerung von Produktionsabläufen notwendigen Daten und Anweisungen zu erfassen, zu verarbeiten, zu speichern und zu verteilen (ERLACH 2010). Eine prozessspezifische Detaillierung von Informationsflüssen ist in diesen Ansätzen nicht vorgesehen.

LUGERT (2019) entwickelt im Kontext von Digitalisierung und Industrie 4.0 ein dynamisches Wertstrommanagement. Dieses adressiert mitunter dynamische Veränderungen zu betrachtender Produktionssysteme, wodurch der jeweils aktuelle Zustand von Wertströmen im Rahmen von Wertstromanalyse und -design betrachtet wird. Darauf aufbauend sollen die im Wertstromdesign entwickelten Soll-Zustände in einer Simulation weiter untersucht werden, um etwaige Auswirkungen veränderter Materialflüsse vor einer Realisierung im Produktionssystem testen zu können (LUGERT & WINKLER 2017, LUGERT ET AL. 2018, LUGERT 2019, LUGERT & WINKLER 2019B). Die Effekte veränderter Informationsflüsse werden nicht näher betrachtet.

HANSMANN (2003) verwendet für die Modellierung von Prozessen der industriellen Auftragsabwicklung in der Produktion ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) als methodische Grundlage. Zur Modellierung betrieblicher Abläufe werden Basiselemente wie Funktionen, Ereignisse und Verknüpfungsoperatoren um Organisationseinheiten, Anwendungssysteme und Daten erweitert. Dadurch kann beispielsweise zwischen papierbasierten und digitalen Daten unterschieden werden. Zudem lassen sich Verantwortlichkeiten und Medienbrüche visuell offenlegen. Somit können die betrachteten Prozesse auf Ineffizienzen untersucht, ihre zeitliche Dauer auf unterschiedlichen Prozesshierarchieebenen aufgezeigt und Digitalisierungsmöglichkeiten einzelner Abläufe und Prozesse hergeleitet werden (HANSMANN 2003). Shopfloor-nahe Prozesse und Prozesse des Materialflusses werden nicht näher betrachtet.

---

<sup>7</sup> Die vorliegende Arbeit nimmt Bezug auf die zitierte Auflage. Erste Ideen wurden bereits 1998 formuliert und veröffentlicht (ROTHER & SHOOK 2009).

Der Ansatz von GESSERT ET AL. (2019) stellt eine Methode dar, welche die an Produktionsprozessen beteiligten Informationsflüsse nach den Kategorien Informationsangebot, Informationshandhabung und Informationsbedarf klassifiziert und visualisiert. In Anlehnung an die Business Process Model and Notation (BPMN) und an die Unified Modeling Language (UML) werden Informationen eindeutig gekennzeichnet und bezüglich ihrer Entstehung und Nutzung spezifiziert. Zudem erfolgen eine weitere Detaillierung von Informationsflüssen hinsichtlich ihrer Frequenz und Dauer sowie eine Differenzierung nach Transformations- oder Translationsvorgängen, um zwischen Medienbrüchen und einer reinen Weitergabe von Informationen unterscheiden zu können (GESSERT ET AL. 2019). Dieser Ansatz beschränkt sich rein auf die Modellierung und Spezifizierung von produktionsprozessnahen Informationsflüssen, ohne jedoch die vom Informationsfluss begleiteten Materialflüsse abzubilden.

PRADES ET AL. (2013) verwenden UML und BPMN für die Modellierung eines durchgängigen Wertstroms. Diese erfolgt sowohl vertikal zwischen dem an der Auftragsabwicklung beteiligten ERP-System und dem MES des eigenen Unternehmens als auch horizontal zu den ERP-Systemen von Lieferanten und Kunden (PRADES ET AL. 2013). Eine detaillierte Modellierung der material- und informationsflussbezogenen Prozesse auf dem Shopfloor wird nicht aufgeführt.

ARROMBA ET AL. (2019) beschreiben einen BPMN-basierten Ansatz, um Informationsflüsse, die für die Auftragsabwicklung im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung von Relevanz sind, zu modellieren. Auf Grundlage dieser Modellierung sollen anhand informationsbezogener Verschwendungsarten Verbesserungsmöglichkeiten aufgedeckt und realisiert werden können (ARROMBA ET AL. 2019). Prozesse des Materialflusses werden nicht detailliert modelliert.

HÄMMERLE & RALLY (2010) stellen die Engineering Notation 3 (EN3) im Kontext der Wertstrommethode vor, die eine weiterentwickelte Modellierung für Material- und Informationsflüsse bietet. Hierdurch können Prozessketten unterschiedlicher Produkte sowie gemeinsam genutzte Ressourcen in einer gemeinsamen Wertstrom-Landkarte abgebildet werden (HÄMMERLE & RALLY 2010). Eine detaillierte Abbildung von Prozessen des Informationsflusses wird dadurch jedoch nicht ermöglicht.

In dem Ansatz von ZOR ET AL. (2010) lassen sich Funktionalitäten und Abhängigkeiten, die mittels der Wertstrommethode abgebildet werden, durch BPMN-Elemente modellieren. Mit diesem BPMN-basierten Ansatz soll eine einheitliche Abbildung von Geschäfts- und Produktionsprozessen und dadurch eine durchgängige Kommunikation zwischen IT-Systemen und Shopfloor erleichtert werden (ZOR ET AL. 2010).

Darüber hinaus spezifizieren ZOR ET AL. (2011) diese BPMN-Erweiterung, indem zusätzliche Attribute, graphische Elemente oder Konnektoren zur näheren Beschreibung von Produktions- und Logistikprozessen eingeführt werden. Dadurch können insbesondere Materialbewegungen mittels BPMN weiter detailliert werden (ZOR ET AL. 2011). Wie eine detaillierte Abbildung von produktionsrelevanten Prozessen des Informationsflusses erfolgen kann, wird nicht betrachtet.

ANTONELLI & STADNICKA (2018) beschreiben in ihrem Ansatz Parameter, die für die Modellierung einer ereignisdiskreten Simulation von Wertströmen erforderlich sind (z. B. Reihenfolge von Produktionsprozessen, Losgrößen, Bearbeitungs- und Rüstzeiten). Demgegenüber werden rein simulativ ermittelbare Parameter aufgeführt, mit denen Produktionsprozesse beispielsweise hinsichtlich ihrer wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Zeitanteile bewertet werden können (ANTONELLI & STADNICKA 2018). In einem weiteren Ansatz beschreiben ANTONELLI ET AL. (2018) eine kombinierte Verwendung von ereignisdiskreter Simulation und von Simulation mittels System Dynamics für die Modellierung von Produktionssystemen. Während ereignisdiskrete Simulation zur detaillierten Modellierung und Simulation von Prozessen mit stochastischem Verhalten angewendet wird, bildet die Simulation mittels System Dynamics die Ursache-Wirkungs-Beziehungen auf Produktionssystemebene ab (ANTONELLI ET AL. 2018). Folglich wird nicht behandelt, ob und wie System Dynamics Prozesse mit stochastischem Verhalten nachbilden kann.

KAISER ET AL. (2019B) fokussieren bei der kombinierten Betrachtung von Wertstrommethode und Wertstromsimulation die Materialflusssimulation, wobei jedem Wertstromelement ein Baustein zur Modellierung in der Simulation zugeordnet ist. Durch die entwickelten Simulationsbausteine lassen sich betrachtete Wertströme mit stochastischem Verhalten modellieren, wobei Eigenschaften von Produktions- und Logistikprozessen sowie einfache Ereignisse im Informationsfluss abgebildet werden können (KAISER ET AL. 2019B). Es werden jedoch keine Simulationsbausteine zur detaillierten Abbildung der Auswirkungen veränderter Informationsflüsse oder zur Untersuchung von Wirkzusammenhängen aufgeführt.

Die vorgestellten Ansätze betrachten allgemein Wertströme mit Fokus auf den zugehörigen Materialflüssen. Weder werden Auswirkungen durch veränderte Informationsflüsse auf die mit ihnen gekoppelten Materialflüsse näher untersucht noch werden die am Wertstrom beteiligten produktionsrelevanten Informationsflussteilnehmer bzw. digitalen Technologien abgebildet.

### 2.5.3 Ansätze zur Modellierung von Wirkzusammenhängen

LOCK (2019) betrachtet in seinem Ansatz Wirkzusammenhänge innerhalb von Prozesssystemen, die wertstromorientierte Produktionsprozesse und produktionsnahe Geschäftsprozesse abbilden. Hierbei werden die Auswirkungen von veränderten Informationen als Output produktionsnaher Geschäftsprozesse auf den jeweiligen Produktionsprozess ermittelt (LOCK & REINHART 2016, LOCK 2019). Dynamische Effekte finden keine Berücksichtigung.

ABDULMALEK & RAJGOPAL (2007) verbinden die Wertstrommethode mit einer ereignisdiskreten Simulation, um die Auswirkungen geplanter und vordefinierter Maßnahmen auf den Wertstrom transparent darlegen zu können. Dadurch sollen prozessuale Wirkzusammenhänge ebenso wie Auswirkungen auf definierte Parameter eines betrachteten Wertstroms aufgezeigt werden (ABDULMALEK & RAJGOPAL 2007). Stochastische Analysen werden hierbei nicht über die Simulation abgebildet und Informationsflüsse nicht näher betrachtet. Ebenso verwenden SCHMIDTKE ET AL. (2014) die ereignisdiskrete Simulation im Bereich der Prozessindustrie, um Auswirkungen von mit der Wertstrommethode hergeleiteten Maßnahmen zu validieren (SCHMIDTKE ET AL. 2014). Wirkzusammenhänge, die von Informationsflüssen ausgehen, werden in diesen beiden Ansätzen nicht näher betrachtet.

ABELE ET AL. (2011, 2012) und WOLFF (2013) entwickeln Ansätze basierend auf der ereignisdiskreten Materialflusssimulation, um Wertströme nicht nur hinsichtlich ihres statischen Verhaltens, sondern auch hinsichtlich zeitlicher Abhängigkeiten und stochastischen Verhaltens untersuchen zu können. Zudem dienen die Simulationsmodelle zur Abschätzung von Auswirkungen geplanter Soll-Zustände einzelner Produktionsprozessparameter auf übergeordnete Produktionskennzahlen. Hierbei sollen durch Parametervariationen geeignete Parameterkonfigurationen für verbesserte Produktionsabläufe identifiziert werden. Die Bestimmung der Genauigkeit des jeweiligen Simulationsmodells erfolgt durch den Abgleich zwischen realen Produktionskennzahlen mit ihren simulativ ermittelten Pendanten (ABELE ET AL. 2011, ABELE ET AL. 2012, WOLFF 2013). Die betrachteten Parameter oder ihre Parametervariationen beziehen sich rein auf Veränderungen des Materialflusses. Informationsflussbedingte Veränderungen werden nicht näher betrachtet.

Ähnlich wie ABELE ET AL. (2011, 2012) und WOLFF (2013) untersuchen MEUDT ET AL. (2017A) aufgenommene Wertströme mit einer Wertstromsimulation. Über die Materialflusssimulation hinaus werden hierbei auch die systemdynamische und die

agentenbasierte Simulation als geeignet eingestuft, um beispielsweise optimale Prozessparameter komplexer Produktionssysteme zu bestimmen, wo analytische Methoden an ihre Grenzen stoßen würden (MEUDT ET AL. 2017A). Obwohl die Autoren von Wertstromsimulation sprechen, werden lediglich Materialflüsse und ihre Veränderungen simulativen Betrachtungen unterzogen.

SCHUH ET AL. (2016) verwenden den System-Dynamics-Ansatz, um im Rahmen von Szenarioanalysen Produktionstechnologien entlang ihres Lebenszyklus (SCHUH ET AL. 2016), jedoch nicht in Bezug auf Wertströme zu beurteilen. Um mehr Informationen zu alternativen Szenarien von aufgenommenen Wertströmen zu erhalten, verwenden STADNICKA & LITWIN (2017, 2019) System Dynamics. Hierfür werden die in einer Wertstromanalyse erfassten Parameter in ein simulationsfähiges System-Dynamics-Modell überführt. Dadurch lassen sich sowohl Abhängigkeiten zwischen Produktionsprozessen modellieren als auch das zeitabhängige Verhalten von Produktionsprozessketten innerhalb des betrachteten Zeitrahmens der Simulation transparent darlegen. Geplante Maßnahmen werden durch Parameterveränderungen von Produktionsprozessen abgebildet und die Auswirkungen auf den Wertstrom simulationsbasiert in Experimenten abgeschätzt (STADNICKA & LITWIN 2017, 2019). Die System-Dynamics-Modellierung beschränkt sich hierbei auf Materialflüsse. Die Modellierung sowie die Auswirkungen von Informationsflüssen werden nicht berücksichtigt.

SCHNELLBACH (2016) betrachtet in seinem Ansatz, wie sich im Rahmen der Wertstrommethode identifizierte Energieeffizienz-Maßnahmen auf Produktionsprozessketten und Materialflüsse auswirken. Aufbauend auf den grundlegenden Wirkzusammenhängen, die sich von den Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme und den zugehörigen Kennzahlen ableiten, wird ein System-Dynamics-Modell entworfen, das die Wirkzusammenhänge eines Produktionsprozesses sowie den Einfluss von Verlusten mit stochastischem Verhalten abbildet. Die Auswirkungen ergriffener Energieeffizienz-Maßnahmen in einzelnen Produktionsprozessen werden über die Verlustarten abgebildet und Wirkzusammenhänge simulativ erschlossen. Die Auswirkungen auf die Zielgrößen einer Produktionsprozesskette werden mit statischen Formeln mathematisch berechnet (SCHNELLBACH 2016). Das System-Dynamics-Modell bildet keine Wirkzusammenhänge von Materialflüssen zwischen Produktionsprozessen bzw. innerhalb der Produktionsprozesskette ab.

GREINACHER ET AL. (2020) analysieren in einem kombinierten Ansatz aus ereignisdiskreter Simulation und Optimierung die Ressourceneffizienz von dynamisch veränderlichen Material-, Energie- und Informationsflüssen. Hierbei sollen signifikante Effekte von material- und energiebezogenen Prozessparametern sowie ausgelöste

Wirkzusammenhänge identifiziert werden (GREINACHER ET AL. 2020). Informationsflussbezogene Parameter werden nicht variiert.

Bezüglich der aufgeführten Ansätze zur Modellierung von Wirkzusammenhängen lässt sich resümieren, dass Auswirkungen auf Materialflüsse, die durch den Produktionsfaktor Information sowie den Prozessen des Informationsflusses bedingt sind, keiner detaillierten Betrachtung unterzogen werden.

## **2.6 Spezifische Ansätze der Wertstrommethode**

### **2.6.1 Allgemeines**

Die Wertstrommethode betrachtet sowohl Material- als auch Informationsflüsse, wobei der Fokus der Betrachtung in der Regel auf den Materialflüssen liegt. Da digitale Technologien hingegen zur Gestaltung, Steuerung und Überwachung von Prozessen des Informationsflusses verwendet werden können, werden nachfolgend neben materialflussorientierten auch informationsflussorientierte Ansätze der Wertstrommethode erörtert.

### **2.6.2 Materialflussorientierte Ansätze**

ROTHER & SHOOK (2009) decken mit der entwickelten Wertstrommethode Verschwendung in Wertströmen auf. Darauf aufbauend können geeignete Maßnahmen zur Verschwendungsbeseitigung identifiziert und umgesetzt werden (ROTHER & SHOOK 2009). KLEVERS (2009) und ERLACH (2010) detaillieren die beiden Phasen der Wertstrommethode, die Wertstromanalyse und das Wertstromdesign, weiter aus. Für die Wertstromanalyse werden beispielsweise weitere Parameter des Materialflusses sowie zugehörige Kennzahlen spezifiziert, die es im Wertstromdesign durch Maßnahmen zur Verschwendungsreduktion zu verbessern gilt. Dem Informationsfluss wird hierbei schwerpunktmäßig die Rolle der Steuerung des Materialflusses beigemessen (KLEVERS 2009, ERLACH 2010).

Neben den vorstehend genannten Ansätzen existieren Weiterführungen der Wertstrommethode, welche die Reduzierung bzw. Beseitigung von Verschwendung insbesondere in logistischen Prozessen fokussieren und die bei der Planung der Logistik in Produktionssystemen unterstützen. Hier werden beispielsweise weitere logistische Prozessbeschreibungen eingeführt (KNÖSSL 2013), logistische Prozessketten über Teilprozesse und standardisierte Prozessbausteine spezifiziert (DURCHHOLZ 2013),

weitere Kennwerte zur Beurteilung der logistischen Leistung eines Produktionssystems eingeführt (PFEFFER 2014) und eine Morphologie zur Gestaltung logistischer Alternativen entwickelt (KAISER ET AL. 2019A). In diesen Ansätzen erfolgt keine wesentliche Detaillierung der Zusammenhänge mit Informationsflüssen.

SEIFERMANN ET AL. (2018) adaptieren die Wertstrommethode, um mit ihrer Anwendung die Prinzipien Orientierung am Kundentakt, Produktion im Fluss und Vermeidung von Verschwendung in Fertigungsbereichen strukturiert realisieren zu können. Das Vorgehen unterstützt bei dem Aufbau von Prozessverständnis, der Stabilisierung von Prozessen sowie der Gestaltung gerichteter und synchronisierter Fertigungsprozesse mit einem Einzelstückfluss. Die Autoren resümieren, dass die Methode die spezifischen Anforderungen erfüllt, die von Fertigungsbereichen ausgehen. Die Methode kann jedoch keine ganzheitliche Betrachtung durch die Wertstrommethode ersetzen (SEIFERMANN ET AL. 2018).

Ein weiterer Ansatz nach SPALT ET AL. (2013) beschreibt die Methode eines globalen Wertstrommanagements, das die Wertstrommethode auf mindestens zwei Wertschöpfungspartner ausweitet, um lokalinduzierte und netzwerkinduzierte Verschwendung in Wertschöpfungsnetzwerken zu identifizieren und zu beseitigen. Identifizierte Maßnahmen zur Verschwendungs-beseitigung können die Profitabilität einzelner Unternehmen lokal bzw. mehrerer Unternehmen im Netzwerk abhängig von ihrer Umsetzung innerhalb des Wertschöpfungsnetzwerkes steigern (SPALT ET AL. 2013). Eine Differenzierung innerbetrieblicher Verbesserungsmöglichkeiten nach lokal und global in Bezug auf Produktionsprozesse und Produktionsprozessketten betrachteter Wertströme wird nicht aufgeführt.

Andere spezifische Ansätze rücken neben Material- und Informationsflüssen weitere Aspekte in den Fokus. Beispielsweise betrachten ERLACH & WESTKÄMPER (2009), REINHART ET AL. (2010, 2011), SCHILLIG ET AL. (2013) oder SCHNELLBACH (2016) über die klassische Wertstrommethode hinaus zusätzlich den Aspekt Energie. Letzgenannter beschreibt in seiner Methodik, wie durch eine energieorientierte Wertstromanalyse Transparenz bezüglich Produktions- und Energiedaten geschaffen wird und Energieverschwendung identifiziert werden kann. Entwickelte Energieeffizienz-Handlungsansätze sollen bei der Generierung prozessspezifischer Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverschwendung unterstützen (SCHNELLBACH 2016).

Den beschriebenen materialflussorientierten Ansätzen der Wertstrommethode ist gemein, dass bei der Anwendung der Ansätze Materialflüsse, der Einsatz physischer



Ressourcen oder auch zusätzliche Aspekte (z. B. Energie) fokussiert werden, Informationsflüsse jedoch nur sekundär und qualitativ betrachtet werden. Qualitative, quantitative oder sogar strukturelle Abhängigkeiten des Materialflusses vom Informationsfluss sowie Auswirkungen von Veränderungen des Informationsflusses werden in den beschriebenen Ansätzen nicht adressiert.

### 2.6.3 Informationsflussorientierte Ansätze

GOTTMANN ET AL. (2013) führen auf, dass durch die Wertstrommethode nicht nur direkte Verschwendung in Materialflüssen, sondern auch indirekte Verschwendung in Informationsflüssen identifiziert werden kann. Hierfür werden sowohl Prozesse des Materialflusses als auch des Informationsflusses in ihre einzelnen Teilprozesse zerlegt und anschließend klassifiziert. Die Klassifizierung unterscheidet nach wertschöpfend und nicht-wertschöpfend sowie notwendig und nicht-notwendig. Entsprechend der Klassifizierung der einzelnen Teilprozesse sind vorhandene Verschwendungen zu reduzieren, zu vermeiden oder zu eliminieren (GOTTMANN ET AL. 2013). Zusammenhänge, wie sich die Beseitigung indirekter Verschwendung durch Informationsflüsse auf die Materialflüsse auswirkt, werden nicht betrachtet.

Während die Ansätze der Wertstrommethode in der Regel Prozesse direkter Unternehmensbereiche fokussieren, greift MAGENHEIMER (2014) auf die Wertstrommethode zurück und adaptiert diese, um sie auf Geschäftsprozesse in indirekten Unternehmensbereichen anzuwenden. Über die Stufen Geschäftsprozessmodellierung, Analyse und Bewertung von Verschwendung sollen nicht-wertschöpfende Prozesse in indirekten Unternehmensbereichen reduziert und eliminiert werden können (MAGENHEIMER 2014, MAGENHEIMER ET AL. 2014). Der Informationsfluss wird in diesem Zusammenhang als Produkt indirekter Unternehmensbereiche betrachtet, der nicht an den physischen Materialfluss gekoppelt ist, weshalb die entwickelte Methodik insbesondere auf die Reduzierung von Schwachstellen des Informationsflusses abzielt.

RISCH ET AL. (2011) adaptieren die Wertstrommethode, um mehr Transparenz bezüglich produktionsnaher Informationsflüsse zu schaffen. Die Adaption führt in diesem Zusammenhang das Abbilden von Arbeitsdokumenten, Datenbausteinen sowie den zugehörigen Schnittstellen und Quelle-Senke-Beziehungen auf. In einer derartigen Informationsflussanalyse sollen insbesondere Ansatzpunkte zur Verbesserung von Datenqualität und Informationsbereitstellung aufgedeckt werden (RISCH ET AL. 2011). Ein Informationsflussdesign wird nicht detailliert.

Um Informationsflüsse in Produktionsabläufen zu visualisieren, deren Defizite aufzudecken sowie Verbesserungspotenziale zu identifizieren, entwickelt ROH (2019) ähnlich wie RISCH ET AL. (2011) eine Informationsflussanalyse, die eine informationsflussorientierte Weiterentwicklung der Wertstromanalyse darstellt. Über eine Informationsflusskarte werden zum einen die Informationsflussteilnehmer in Form von Sequenzdiagrammen und zum anderen die sequenzielle Abfolge der Prozesse des Informationsflusses abgebildet. Ausgehend von den sieben Verschwendungsarten nach OHNO (2013) werden die informationsflussorientierten Performanceindikatoren Automatisierung, Zentralität, Echtzeitfähigkeit, Medienbrüche und Rückfragen entwickelt, anhand derer Prozesse des Informationsflusses bewertet werden (ROH 2019, ROH ET AL. 2019). Im Ausblick wird der Bedarf nach informationsflussbezogenen Gestaltungsrichtlinien verdeutlicht, um im Sinne des Autors in einem weiteren Schritt ein Informationsflussdesign zu entwickeln (ROH 2019).

Die Aufnahme von Informationsflüssen nach GESSERT ET AL. (2019) basiert auf leitfragenorientierten Experteninterviews, auf denen die definierte Visualisierung von Prozessen des Informationsflusses aufbaut. Verbesserungspotenziale werden durch den Abgleich von Ist- und Soll-Wertstrom ermittelt, wobei Prozesse des Informationsflusses ein Gleichgewicht zwischen Informationsangebot und Informationsbedarf schaffen sollen (GESSERT ET AL. 2019). Ein methodisch gestütztes Vorgehen, wie der Soll-Wertstrom ermittelt werden kann, wird nicht aufgeführt. Zudem werden keine Zusammenhänge mit Materialflüssen hergestellt.

UCKELMANN (2014) beschreibt, wie durch den Einsatz von Industrie 4.0-Technologien Einfluss auf informationslogistische Prozesse genommen werden kann. Hier erfolgt eine Aufschlüsselung, welche Aufgaben diese Technologien hinsichtlich der Informationslogistik übernehmen können. In diesem Zusammenhang werden Verschwendungsarten informationslogistischer Prozesse aufgeführt sowie Gestaltungsmöglichkeiten des Informationsflusses beschrieben. Auf Grundlage der im informationslogistischen Kontext beschriebenen Verschwendungsarten sowie Gestaltungsmöglichkeiten wird die Eignung von Wertstromanalyse und Wertstromdesign aufgeführt (UCKELMANN 2014). Es wird jedoch keine Detaillierung gegeben, wie informationslogistische Prozesse modelliert und die Bestandteile der Wertstrommethode angewendet werden sollen. Auch in dieser Betrachtung werden die Auswirkungen von Informationsflüssen auf Materialflüsse nicht behandelt.

MEUDT ET AL. (2016A) knüpfen an die informationslogistische Perspektive an und entwickeln für die Informationslogistik spezifische Verschwendungsarten und Ziel-

setzungen für schlanke Informationsflüsse. Verschwendungen in informationslogistischen Prozessen werden in die Bereiche Datengenerierung und -übertragung, Datenverarbeitung und -speicherung sowie Datennutzung untergliedert und zugehörige Verschwendungskategorien beschrieben (MEUDT ET AL. 2016A). Um diese Verschwendungskategorien in informationslogistischen Prozessen zu erfassen und zu analysieren, entwickeln MEUDT ET AL. (2017B) eine „Wertstromanalyse 4.0“. Hierbei wird zunächst der Materialfluss einzelner Stufen der Wertschöpfungskette und der dazwischenliegenden Logistikabläufe aufgenommen. Darauf aufbauend werden spezifische Informationen zu den Prozesskennzahlen und Prozessparametern des Materialflusses dokumentiert, indem diese hinsichtlich der Informationsflussrichtung, des Speichermediums und ihrer Nutzung in unter dem Materialfluss abgebildeten Swimlanes weiter spezifiziert werden. Die in diesem Rahmen entwickelten Leitfragen zu den Verschwendungskategorien unterstützen die Analyse der informationslogistischen Prozesse, indem dadurch informationslogistische Verschwendung erfasst wird (MEUDT ET AL. 2017B). HARTMANN ET AL. (2018A) entwickeln, aufbauend auf der Wertstromanalyse 4.0, ein „Wertstromdesign 4.0“, das ein Vorgehen zur Identifikation und Implementierung von Verbesserungen im Wertstrom bereitstellen soll. Um den zukünftigen Zustand eines Wertstroms zu ermitteln, wird der Wertstrom anhand von Leitfragen zunächst in einen Fluss gebracht. In einem weiteren Schritt erfolgt die iterative Verbesserung des Materialflusses durch den direkten Einsatz digitaler Technologien. Darauf aufbauend wird die Integration von Produkt- und Prozessinformationsfluss beschrieben. Hierbei wird definiert, welche Daten und Informationen in Prozessen benötigt werden. Zudem wird definiert, welche Daten und Informationen von Prozessen bereitgestellt und zwischen Prozessen ausgetauscht werden müssen (HARTMANN ET AL. 2018A). Die reduzierten und eliminierten Verschwendungen beziehen sich in diesem Zusammenhang auf Prozesse des Informationsflusses und nicht primär auf Verschwindungsbeseitigung in den zugehörigen Materialflüssen.

MOLEND A ET AL. (2019) stellen, aufbauend auf der Wertstromanalyse 4.0, einen Ansatz vor, der Prozesse des Informationsflusses als Teil von Produktionsprozessen betrachtet, wodurch bei der Bewertung von Informationsflüssen auch Materialflüsse Berücksichtigung finden können. Hierbei werden die Informationsflussteilnehmer, die Art der Kommunikation, der Ursprung, der Zielort sowie der Verwendungszweck der Informationen beschrieben. Verknüpfungen zwischen diesen vordefinierten Beschreibungen stellen den prozessualen Ablauf betrachteter Produktionsprozesse dar (MOLEND A ET AL. 2019). Weiterführende Schritte in Bezug auf ein Wertstromdesign werden in diesem Ansatz nicht betrachtet.

Sowohl LEWIN ET AL. (2019) als auch SOSSENHEIMER ET AL. (2019) knüpfen bei ihrer erweiterten Wertstrommethode an die Ausführungen von MEUDT ET AL. (2017B) und HARTMANN ET AL. (2018A) an. LEWIN ET AL. (2019) verwenden hierfür unter anderem die definierten informationslogistischen Verschwendungsarten und die Notation zur Wertstromvisualisierung. Ergänzungen sind zum einen eine detailliertere Klassifizierung der Speichermedien und Speichersysteme. Zum anderen werden weitere Symbole eingeführt, um beispielsweise Datenanalysepunkte und Schnittstellen kenntlich zu machen. Darüber hinaus werden Gestaltungsprinzipien für das Wertstromdesign eingeführt (LEWIN ET AL. 2019). Die Folgen und Effekte auf Materialflüsse werden nicht näher betrachtet. SOSSENHEIMER ET AL. (2019) beschränken sich in ihrem Ansatz auf die Wertstromanalyse und verwenden die definierte Formalisierung und Vorgehensweise, um Transparenz bezüglich des Energie- und Ressourcenverbrauchs in Produktionsnetzwerken zu schaffen. Neben energie- und ressourcenbezogenen Daten sowie Informationen, die in automatisierten Datenbanken hinterlegt sind, wird auch auf Daten und Informationen von Auto-ID-Lösungen zurückgegriffen, welche die Materialbewegungen in Produktionsnetzwerken abbilden (SOSSENHEIMER ET AL. 2019). Ein Vorgehen im Sinne eines Wertstromdesigns zur Behebung identifizierter Schwachstellen wird nicht beschrieben.

Hinsichtlich der informationsflussorientierten Ansätze der Wertstrommethode lässt sich zusammenfassen, dass Prozesse des Informationsflusses, z. B. in Bezug auf sogenannte informationslogistische Verschwendungen, analysiert werden können. Einzelne Ansätze bauen auf der Analyse von Informationsflüssen auf und leiten Methoden an der strukturiert bei der Gestaltung verbesserter Informationsflüsse an. Die Betrachtung von Informationsflüssen erfolgt jedoch weitestgehend ohne Berücksichtigung möglicher Zusammenhänge und Auswirkungen auf Materialflüsse.

### 3 Konzeption der Methodik

*„Probleme kann man niemals mit derselben Denkweise lösen,  
durch die sie entstanden sind.“*

– Albert Einstein –

#### 3.1 Überblick

Bezugnehmend auf den Problemkontext und den Stand des Wissens wird in Kapitel 3 die Konzeption der Methodik beschrieben. Hierfür wird der Stand des Wissens bezüglich seiner Grundlagen in den Folgerungen resümiert (Abschnitt 3.2). Zudem wird der Handlungsbedarf aus der Betrachtung und Diskussion der thematisierten Ansätze aus dem Stand der Forschung abgeleitet (Abschnitt 3.3). Anschließend werden die Anforderungen an die Methodik formuliert (Abschnitt 3.4). Diese Zusammenhänge werden in Abbildung 3.1 verdeutlicht.

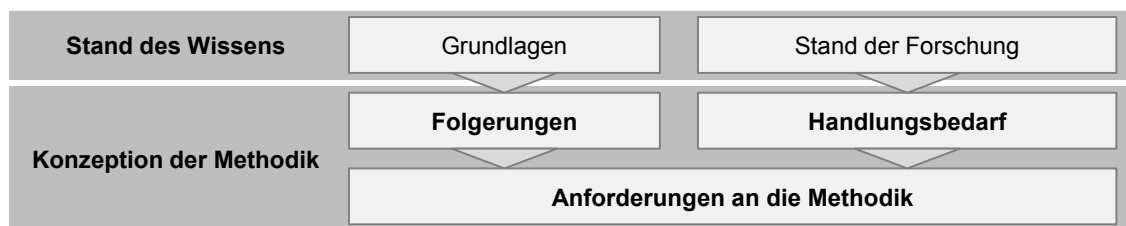


Abbildung 3.1: Übersicht zur Konzeption der Methodik

#### 3.2 Folgerungen

In den Abschnitten 2.2 und 2.3 wurden ausgehend von der Ausgangssituation und Zielsetzung die relevanten Grundlagen für die vorliegende Arbeit bezüglich Ganzheitlicher Produktionssysteme und Digitalisierung in der Produktion betrachtet. Es lässt sich folgern, dass die Abläufe in den Wertströmen und den zugehörigen Produktionsprozessketten Ganzheitlicher Produktionssysteme hinsichtlich Wertdefinition durch den Kunden, Vermeidung von Verschwendung und einer Produktion im Fluss ausgerichtet sind. Der Produktionsfaktor Information ist hierbei mit den durch Ressourcen abgebildeten Materialflüssen gekoppelt. Durch die beschriebenen Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme Durchlaufzeit, Produktivitätsgrad, Qualitätsgrad und Every Part Every Interval können die Leistungsfähigkeit von Wertströmen und

die Auswirkungen ergriffener Maßnahmen zur Verbesserung von Produktionsabläufen quantifiziert werden. Im Zuge dessen hat sich die Wertstrommethode mit ihren Schritten der Wertstromanalyse und des Wertstromdesigns in der industriellen Praxis etabliert. Durch diese Schritte können in Wertströmen strukturiert Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert und Maßnahmen abgeleitet werden. Zudem haben Information, Informationsfluss, Informationslogistik, Informationssystem sowie Informationsflussteilnehmer hinsichtlich der Digitalisierung in der Produktion und im Kontext der vorliegenden Arbeit im Fokus zu stehen. In diesem Zusammenhang sind digitale Technologien als produktionsrelevante Informations- und Kommunikationstechnologien zu interpretieren, durch deren Einsatz sich Informationsflüsse verändern lassen. Durch den zielgerichteten Einsatz digitaler Technologien können das Planen, Steuern, Kontrollieren und Überwachen von mit dem Informationsfluss gekoppelten Materialflüssen adressiert werden. Durch die Integration ausgereifter digitaler Technologien in den Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme können folglich effiziente und effektive Abläufe in Wertströmen gestaltet werden.

### 3.3 Handlungsbedarf

In den Abschnitten 2.4, 2.5 und 2.6 wurden in Bezug auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit relevante Ansätze zur Integration digitaler Technologien, Ansätze zur Modellierung von Wertströmen und spezifische Ansätze der Wertstrommethode betrachtet und diskutiert. Basierend auf der beschriebenen Ausgangssituation und Motivation sowie basierend auf den Grundlagen zeigt sich, dass die Ansätze des Stands der Forschung unterschiedliche Bereiche bezüglich des Problemkontexts der vorliegenden Arbeit abdecken. Jedoch erfolgt oftmals eine jeweils spezifische Betrachtung einzelner Schwerpunkte, was einem durchgängigen Ansatz zur Integration digitaler Technologien in den Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme entgegensteht. Aus diesem Defizit lässt sich der übergeordnete Handlungsbedarf der vorliegenden Arbeit ableiten, der sich in die vier Schwerpunkte *Formalisierung*, *informationsbezogene Gestaltung*, *Wirkzusammenhänge* und *Vorgehensweise* untergliedern lässt. Im Folgenden wird zu diesen Schwerpunkten jeweils das vorliegende Defizit bestehender Ansätze zusammenfassend aufgeführt. Nachgelagert wird der sich daraus ableitende Handlungsbedarf beschrieben.

#### Formalisierung

Digitale Technologien beschreiben Werkzeuge zur Gestaltung, Steuerung und Überwachung von Prozessen des Informationsflusses, die an Materialflüsse in der Produktion gekoppelt sind. Es existieren unterschiedliche Ansätze, die digitale Technologien

zum einen anhand ihrer Eigenschaften beschreiben und zum anderen den Prozessbezug auf spezifischen Betrachtungsebenen herstellen. Die Eigenschafts- und Prozessorientierung der bestehenden Ansätze stellen jedoch keine gesamtheitliche Betrachtung hinsichtlich des Material- und Informationsflusses sowie hinsichtlich der am Material- und Informationsfluss beteiligten Ressourcen bereit.

Es besteht folglich Handlungsbedarf bezüglich einer Formalisierung, die eine generische Beschreibung sowie eine prozessbezogene Schematisierung digitaler Technologien ermöglicht, um ihren Einfluss auf zu betrachtende unternehmensspezifische Wertströme abzubilden. Hierbei gilt es im Rahmen der Modellierung von Wertströmen den direkten Einfluss sowohl von produktionsrelevanten digitalen Technologien als auch von weiteren produktionsrelevanten Informationsflussteilnehmern abbilden zu können. Hieraus soll der Einfluss auf Prozesse des Informationsflusses unter Berücksichtigung der Prozesse des Materialflusses ersichtlich werden. Darüber hinaus ist bei der Formalisierung dem Anspruch gerecht zu werden, sowohl aktuelle als auch zukünftige digitale Technologien mit der zu entwickelnden Formalisierung beschreiben zu können.

#### **Informationsbezogene Gestaltung**

Bestehende Ansätze in Bezug auf den Einsatz digitaler Technologien zur Verbesserung von Wertströmen adressieren entweder Materialflüsse oder Informationsflüsse, indem jeweils gesonderte Verschwendungsarten zu Materialflüssen oder Informationsflüssen im Betrachtungsfokus stehen. Beziehungen zwischen material- und informationsflussbedingten Verschwendungen werden unzureichend herausgestellt. Zudem ist in der Regel nicht klar beschrieben, wie Informationsfluss, Informationslogistik und Informationssystem gestaltet sein sollen, um Prozessverbesserungen hinsichtlich der Material- und Informationsflüsse zu erreichen, oder wie und in welchem Umfang digitale Technologien zu einer Verschwendungsreduzierung in Wertströmen beitragen können.

Es besteht daher Handlungsbedarf, ein Leitbild zur informationsbezogenen Gestaltung von Wertströmen zu entwickeln, aus dem primär Maßnahmen zur Verschwendungs-beseitigung von Informationsflüssen abgeleitet werden können. Diese Maßnahmen sollen darüber hinaus zur Verschwendungs-beseitigung in und somit zur Verbesserung von Materialflüssen führen. Zudem gilt es die Effekte digitaler Technologien in Bezug auf abgeleitete Maßnahmen herzustellen sowie ihre Effekte auf unternehmensspezifische Produktionsprozessketten ermitteln zu können, wenn digitale Technologien in Wertströmen integriert werden sollen.

#### **Wirkzusammenhänge**

In den bestehenden Ansätzen wird das Verhalten der Wertströme und ihrer Produktionsprozessketten als komplex und dynamisch und das Verhalten einzelner Elemente von Produktionsprozessketten als stochastisch beschrieben. Werden lokal Veränderungen an Prozessen des Wertstroms vorgenommen, so kann dies zu unerwarteten Auswirkungen innerhalb einer Produktionsprozesskette und bei den zugehörigen Zielgrößen führen. Um derartige Eigenschaften von Produktionsprozessketten abzubilden und nachvollziehen zu können, entwickeln die Ansätze simulationsgestützte Untersuchungsmodelle. Allerdings werden in diesen Ansätzen Veränderungen von Prozessen des Informationsflusses, die von einer Integration digitaler Technologien ausgehen können, nicht betrachtet.

Es besteht der Handlungsbedarf, Wirkzusammenhänge in Wertströmen, die von der Integration digitaler Technologien ausgehen, abbilden zu können. Prozessuale Veränderungen und ihre Auswirkungen auf Zielgrößen von unternehmensspezifischen Wertströmen sollen nachvollzogen werden können.

#### **Vorgehensweise**

Die Wertstrommethode wird in mehreren Ansätzen als geeignetes Mittel aufgeführt, um Produktionsprozessketten im Rahmen einer Wertstromanalyse zu visualisieren und zu bewerten sowie im Rahmen eines Wertstromdesigns Verschwendung durch prozessuale Umgestaltung zu reduzieren oder zu eliminieren. Neben materialflussorientierten Ansätzen existieren auch ausgereifte informationsflussorientierte Ansätze der Wertstrommethode, jedoch werden Wertstromanalyse und Wertstromdesign oftmals losgelöst voneinander betrachtet. Darüber hinaus wird als wesentliches Defizit der Wertstrommethode ihr statischer Charakter aufgrund durchgeführter Momentaufnahmen hervorgehoben, was von mehreren Ansätzen durch eine Kopplung der Wertstrommethode mit simulationsgestützten Betrachtungen behoben wird. Dadurch lassen sich statische Momentaufnahmen um zeitveränderliches und stochastisches Verhalten anreichern sowie komplexe und dynamische Wirkzusammenhänge nachvollziehen. Jedoch werden in diesen Ansätzen in der Regel keine informationsflussorientierten Betrachtungen zur Abbildung von Effekten digitaler Technologien vorgenommen. Eine gesamtheitliche informationsflussorientierte Vorgehensweise, welche die Wertstromanalyse, das Wertstromdesign sowie eine Wertstromsimulation abdeckt, wird von den bestehenden Ansätzen nicht beschrieben.

Es besteht Handlungsbedarf, eine Vorgehensweise zu entwickeln, die Produktionsverantwortliche bei der Analyse und beim Design unternehmensspezifischer Wertströme unterstützt. Darüber hinaus soll die Vorgehensweise Transparenz bezüglich



kausaler Wirkzusammenhänge von geplanten Maßnahmen zur Integration digitaler Technologien schaffen sowie die Auswirkungen auf Wertströme und auf die Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme abbilden.

Die Abbildung 3.2 setzt den Stand der Forschung in Bezug zum abgeleiteten Handlungsbedarf und verdeutlicht die identifizierten Defizite.

		Formalisierung	Informationsbe- zogene Gestaltung	Wirkzu- sammenhänge	Vorgehensweise
<b>Legende:</b>					
	○ nicht erfüllt				
	◐ teilweise erfüllt				
	◑ größtenteils erfüllt				
	● erfüllt				
<b>Integration digitaler Technologien</b>	eigenschaftsbasiert	◑	◐	○	◐
	prozessorientiert	◐	◐	◐	◐
<b>Modellierung von Wertströmen</b>	Abbildung von Material- und Informationsflüssen	◑	◐	◐	◑
	Modellierung von Wirkzusammenhängen	◐	○	●	◐
<b>Wertstrommethode</b>	materialflussorientiert	●	○	◐	●
	informationsflussorientiert	◐	◐	○	◐

Abbildung 3.2: Stand der Forschung in Bezug zum abgeleiteten Handlungsbedarf

Im Sinne der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit und unter Berücksichtigung des Stands der Forschung ist ein Ansatz zu entwickeln, der einen Beitrag zur Behebung der identifizierten Defizite leistet. Der zu entwickelnde Ansatz soll deshalb vor dem Hintergrund des abgeleiteten Handlungsbedarfs Problemstellungen des Problemkontexts lösen können. Die für die Entwicklung des Ansatzes erforderlichen forschungsleitenden Anforderungen werden nachstehend beschrieben.

## 3.4 Anforderungen an die Methodik

### 3.4.1 Allgemeines

Anwendungsorientierte Forschung, der sich die vorliegende Arbeit zuordnen lässt (vgl. Abschnitt 1.4), verfolgt das Ziel, „Regeln, Modelle und Verfahren für praktisches Handeln zu entwickeln“ (ULRICH 1982). In Bezug auf dieses Ziel und die Merkmale anwendungsorientierter Forschung sind die folgenden Leitlinien bei der Entwicklung der Methodik zu berücksichtigen (STEINHÄUBER 2019 nach ULRICH 1982):

**Allgemeingültigkeit:** Die hervorgebrachten Ergebnisse müssen in Bezug auf den beschriebenen Problemkontext allgemeingültigen Charakter aufweisen.

**Anwendbarkeit im Problemkontext:** Anwender der Methodik sind dahingehend zu befähigen, dass sie bezüglich des Problemkontexts unterschiedliche Problemstellungen aus der industriellen Praxis lösen können.

**Richtigkeit der Ergebnisse:** Die hervorgebrachten Ergebnisse müssen für den Problemkontext gültig sein, um unterschiedliche Problemstellungen lösen zu können.

**Wirtschaftlichkeit der Anwendung:** Die mit der Methodik gelösten Problemstellungen sollen für Anwender einen wirtschaftlichen Nutzen ermöglichen. Die Wirtschaftlichkeit durch die Anwendung der Methodik ist gegeben, wenn der wirtschaftliche Nutzen die erbrachten Aufwände übersteigt.

Auf Basis der formulierten Leitlinien werden in Bezug auf die Folgerungen und den Handlungsbedarf die nachstehend aufgeführten Anforderungen hinsichtlich einer Formalisierung, einer informationsbezogenen Gestaltung, Wirkzusammenhängen sowie einer Vorgehensweise abgeleitet. Entsprechend der Forschungsmethodik und des Forschungsprozesses wurden diese forschungsleitenden Anforderungen parallel und iterativ zur Synthese des bestehenden Wissens entwickelt (vgl. Abschnitt 1.5).

#### 3.4.2 Formalisierung

**Vollständigkeit:** Prozesse und Akteure des Wertstroms sollen durch die Formalisierung abgebildet werden können. Hierbei bedarf es einer detaillierten Abbildbarkeit von Prozessen des Informationsflusses, die in Beziehung zu Prozessen des Materialflusses stehen. In diesem Zusammenhang müssen alle am Wertstrom beteiligten Akteure sowie die relevanten digitalen Technologien, die bereits Teil des bestehenden Informationssystems sind oder zum Informationssystem ergänzt werden sollen, in der Formalisierung abgebildet werden können.

**Modularität und prozessbezogene Eignung:** Die Formalisierung soll modular und entsprechend den Prozessen und Akteuren des Wertstroms verwendet werden können. Zudem soll eine Fokussierung auf die situativen Gegebenheiten eines betrachteten Wertstroms und seiner Prozesse unterstützt werden, um zusätzliche und unzweckmäßige Formalisierungsaufwände zu vermeiden.

**Zeitliche Beständigkeit:** Digitale Technologien unterliegen einer stetigen Weiterentwicklung bzw. neue digitale Technologien entstehen. Die entwickelte Formalisierung soll sowohl bestehende als auch zukünftige digitale Technologien berücksichtigen und abbilden können.

### 3.4.3 Informationsbezogene Gestaltung

**Leitbildcharakter:** Die informationsbezogene Gestaltung soll ein Leitbild darstellen, wie vorteilhafte Informationsflüsse zu gestalten sind, um positive Effekte auf Materialflüsse erzielen zu können. In diesem Rahmen gilt es zudem allgemeine informationsbedingte Verschwendungsarten herauszustellen, um Ansatzpunkte für die informationsbezogene Gestaltung von Wertströmen zu identifizieren. Die Anwendung der informationsbedingten Verschwendungsarten soll auf unterschiedliche Problemstellungen des Problemkontexts möglich sowie der Beitrag digitaler Technologien zu einer informationsbezogenen Gestaltung ersichtlich sein.

**Objektivität:** Die informationsbedingten Verschwendungsarten und die informationsbezogene Gestaltung sind so zu beschreiben, dass ihre Anwendung anwenderunabhängig ist und bei unterschiedlichen Anwendern zu übereinstimmenden Ergebnissen führt.

### 3.4.4 Wirkzusammenhänge

**Skalierbarkeit:** Verschiedene Wertströme unterschiedlichen Umfangs, welche die grundlegenden Merkmale Ganzheitlicher Produktionssysteme aufweisen, sind abzubilden. Hierbei soll die Integration digitaler Technologien in Produktionsprozessketten betrachtet werden können.

**Gesamtheitlichkeit:** Es soll die für den Problemkontext erforderliche vollumfängliche Abbildung von Produktionsprozesseigenschaften sowie von zugehörigen Wirkzusammenhängen zwischen den Produktionsprozessen möglich sein. Hierbei sind neben Prozessen des Materialflusses auch Prozesse des Informationsflusses unter Berücksichtigung stochastischen Verhaltens abzubilden.

**Berücksichtigung von Dynamik:** Da die Bestandteile der Produktionsprozesskette eines Wertstroms über den Zeitverlauf gegenseitig Auswirkungen aufeinander haben können, ist dynamisches Verhalten mit abzubilden.

### 3.4.5 Vorgehensweise

**Prozessorientierung:** Die betrachteten Wertströme mit den zugehörigen Prozessen zu Material- und Informationsflüssen sollen im Fokus der Betrachtung stehen. Die Analyse und Gestaltung der zugehörigen Abläufe in Bezug auf die Integration digitaler Technologien soll prozessorientiert erfolgen können.

**Vergleichbarkeit:** Bei der Betrachtung der Wertströme von Produktionsprozessketten lassen sich unterschiedliche Szenarien unter Berücksichtigung der Integration digitaler Technologien aufstellen. Die Ergebnisse unterschiedlicher Szenarien sollen untereinander vergleichbar sein.

**Praxistauglichkeit:** Die Praxistauglichkeit der Vorgehensweise ist gegeben, wenn insbesondere ein hinnehmbarer Aufwand, Robustheit und Akzeptanz ihrer Anwendung gegeben sind. Ein hinnehmbarer Aufwand der Anwendung liegt vor, wenn dieser in einem vertretbaren Umfang unter Maßgabe der Wirtschaftlichkeit steht. Darüber hinaus soll die Vorgehensweise robust gegenüber Anwendungsfehlern sein, indem sie einfach anwendbar und nachvollziehbar ist sowie die durchzuführenden Schritte intuitiv gestaltet sind. Darüber hinaus soll die Vorgehensweise eine akzeptierte Lösung für Anwender darstellen, um langfristig in Unternehmen Einsatz zu finden und ihre Nachhaltigkeit sicherzustellen.

## 4 Beschreibung der Methodik

### 4.1 Überblick

Der Problemkontext, der Stand des Wissens und die Konzeption der Methodik sind die Basis für das Kapitel 4, um in Bezug auf die Forschungsmethodik die Komponenten abzuleiten (Abschnitt 4.2). Anschließend wird der Aufbau der Methodik skizziert, indem die Bestandteile der Komponenten aufgeführt werden (Abschnitt 4.3).

### 4.2 Komponenten

Aufbauend auf dem Stand des Wissens lassen sich aus den forschungsleitenden Anforderungen, die in Abschnitt 3.4 beschrieben sind, die Komponenten der zu entwickelnden Methodik ableiten. Die Anforderungen an die Methodik in Bezug auf Formalisierung, informationsbezogene Gestaltung, Wirkzusammenhänge und Vorgehensweise führen unter Berücksichtigung der Forschungsmethodik (vgl. Abschnitt 1.5) zu den beiden Komponenten Strukturmodell und Vorgehensweise. Abbildung 4.1 verdeutlicht in diesem Zusammenhang, an welchen Anforderungen sich die Entwicklung der beiden Komponenten der Methodik orientiert.

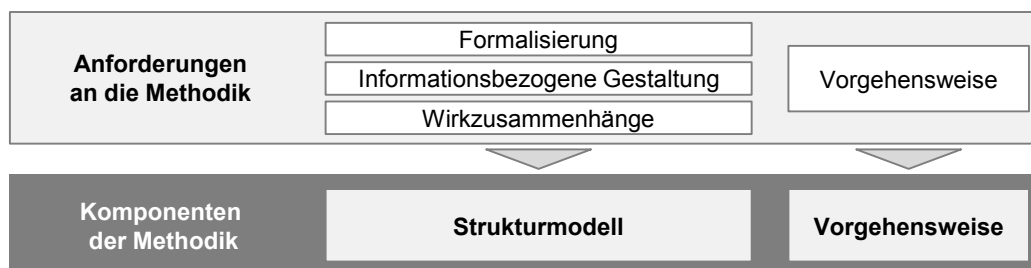


Abbildung 4.1: Zuordnung der Anforderungen zu den Komponenten der Methodik

Im Rahmen des Strukturmodells erfolgt die Modellbildung, in welcher wesentliche Aspekte der Realität in Bezug auf den Problemkontext der vorliegenden Arbeit konzentriert werden. Die Vorgehensweise greift die Ergebnisse des Strukturmodells auf und zeigt Anwendern die durchzuführenden Schritte auf, die bei der Lösung von Problemstellungen des Problemkontexts erforderlich sind.

### 4.3 Aufbau

Der beschriebene Problemkontext, die Folgerungen sowie der Handlungsbedarf begründen die Notwendigkeit der Methodik. Innerhalb dieses Gesamtzusammenhangs setzt sich die Methodik aus dem Strukturmodell und der Vorgehensweise zur Integration digitaler Technologien zusammen. In dem Strukturmodell werden die Formalisierung informationsflussorientierter Wertströme, die informationsbezogene Gestaltung von Wertströmen sowie die Modellierung von Wirkzusammenhängen in Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme entwickelt. In der Vorgehensweise werden eine informationsflussorientierte Wertstromanalyse und ein informationsflussorientiertes Wertstromdesign entwickelt sowie eine simulationsgestützte Bewertung der Integration digitaler Technologien ermöglicht. Als Ergebnis der Anwendung der entwickelten Methodik sollen Lösungen zu den im Problemkontext vorliegenden Problemstellungen gefunden werden können. Abbildung 4.2 fasst diese Einordnung und den Aufbau der Methodik zusammen.



Abbildung 4.2: Einordnung und Aufbau der Methodik

Der dargestellte Aufbau der Methodik spiegelt sich in den Kapiteln 5 und 6 wider. Die Entwicklung der Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme und die zugehörigen Ergebnisse des Forschungsprozesses werden nachstehend detailliert beschrieben.

## **5 Strukturmodell zur Integration digitaler Technologien**

### **5.1 Überblick**

Das Kapitel 5 beschreibt das Strukturmodell zur Integration digitaler Technologien, auf das die Vorgehensweise aus Kapitel 6 zurückgreift. Das vorliegende Kapitel geht in diesem Zusammenhang zunächst auf die Formalisierung informationsflussorientierter Wertströme ein (Abschnitt 5.2). Anschließend werden die informationsbezogene Gestaltung von Wertströmen (Abschnitt 5.3) und die Modellierung von Wirkzusammenhängen in Wertströmen (Abschnitt 5.4) beschrieben. Dieses Strukturmodell hinsichtlich der Formalisierung, der Gestaltung und der Wirkzusammenhänge bildet die theoretischen Vorarbeiten, um die Schritte der Vorgehensweise aus Kapitel 6 mit Instrumentarien zur Analyse, Gestaltung und Bewertung zu unterstützen. Das Kapitel 5 schließt mit einem Fazit (Abschnitt 5.5).

### **5.2 Formalisierung informationsflussorientierter Wertströme**

#### **5.2.1 Allgemeines**

Um Wertströme zu formalisieren, wird zunächst eine allgemeine Klassifizierung entwickelt, anhand welcher sich Informationsflussteilnehmer bzw. digitale Technologien eines Informationssystems, die an der Ausführung von Abläufen eines Wertstroms beteiligt sind, beschreiben lassen (Abschnitt 5.2.2). Die allgemeinen Fähigkeiten von Informationsflussteilnehmern und digitalen Technologien sollen über die im Anschluss hergeleiteten Transformationsarten (Abschnitt 5.2.3) und Funktionen (Abschnitt 5.2.4) beschrieben werden können. Anschließend wird auf Grundlage dieser Klassifikation, den Transformationsarten und Funktionen eine Schematisierung informationsflussorientierter Wertströme entwickelt, welche die Abbildung von Prozessen des Wertstroms, wie diese von den Informationsflussteilnehmern ausgeführt werden, unterstützt (Abschnitt 5.2.5). Abschließend werden die im Wertstrom zu berücksichtigenden Parameter eingeführt (Abschnitt 5.2.6).

#### **5.2.2 Klassifizierung von Informationsflussteilnehmern**

Bei der Beschreibung von digitalen Technologien ist die zentrale Fragestellung zu fokussieren, wie eine Beschreibung abstrakt und entkoppelt von der dynamischen Weiterentwicklung digitaler Technologien auszusehen hat. Die Beschreibung soll

folglich allgemeingültigen Charakter aufweisen, um neben dem Status quo auch Weiterentwicklungen ebenso wie Neuentwicklungen digitaler Technologien abbilden zu können. Hierzu ist es erforderlich, den Abstraktionsgrad zur Beschreibung so zu wählen, dass diese Anforderung erfüllt werden kann (HOELLTHALER ET AL. 2019A).

Technologie ist die „Wissenschaft von der Umwandlung von Roh- und Werkstoffen in fertige Produkte“ und beschreibt die „Gesamtheit der zur Gewinnung oder Bearbeitung von Stoffen nötigen Prozesse und Arbeitsgänge“ (DUDEN 2017). Im Kontext dieser Arbeit fokussieren digitale Technologien die Handhabung produktionsrelevanter Informationen, die für Produktionsabläufe und zur Herstellung von Produkten benötigt werden. In der industriellen Praxis können digitale Technologien somit als Informationsflussteilnehmer verstanden werden, die Prozesse des Informationsflusses und die Informationslogistik beeinflussen. Sie sind damit Teilmenge des Informationssystems, das die Infrastruktur für die Versorgung von Prozessen des Materialflusses mit dem Produktionsfaktor Information sicherstellt. Digitale Technologien stehen hierbei in Interaktion mit weiteren Informationsflussteilnehmern, die in den Informationsflüssen der Auftragsabwicklung involviert sind. Zu diesen Informationsflussteilnehmern zählen beispielsweise Ressourcen der Feld- und Prozessebene wie Menschen oder Betriebsmittel sowie das Betriebsmanagement, die Betriebssteuerung und die Unternehmensdomäne (DIN EN 62264-1). Folglich bedarf es bei der Klassifizierung von Informationsflussteilnehmern einer gesamtheitlichen Betrachtung, die zum einen die Einordnung von digitalen Technologien und zum anderen die Einordnung weiterer Informationsflussteilnehmer ermöglicht. Darüber hinaus gilt es Analogien von und Abhängigkeiten zwischen Prozessen des Informationsflusses und den physischen Prozessen des Materialflusses herzustellen (ARNOLD & FURMANS 2019).

Für die gesamtheitliche Betrachtung von Informationsflussteilnehmern wird die im Folgenden erläuterte eigenschaftsbasierte und prozessorientierte Klassifizierung über drei Ebenen entwickelt (vgl. Abbildung 5.1). Diese Klassifizierung wird von den „5M“ nach Ishikawa (KAMISKE & BRAUER 2011, VDI 2870-2), von den Ebenen des Hierarchiemodells nach DIN EN 62264-1 und SIEPMANN (2016) sowie vom Kommunikationsmodell nach ARNOLD & FURMANS (2019) abgeleitet, wobei die oben aufgeführten Anforderungen und Rahmenbedingungen berücksichtigt sind.

### **Ebene 3: Führung und Leitung**

Diese Ebene fasst die Abläufe übergeordnet agierender produktionsrelevanter Informationsflussteilnehmer zusammen, die insbesondere für die Auftragsabwicklung verantwortlich sind. Hier werden insbesondere administrative und koordinierende Prozesse des Informationsflusses durchgeführt.



## Ebene 2: Daten- und Informationsträger

In dieser Ebene werden diejenigen Objekte aufgeführt, die produktionsrelevante Daten- und Informationen enthalten. Eine Besonderheit dieser Ebene ist, dass hier keine Prozesse des Informationsflusses oder des Materialflusses ausgeführt werden.

## Ebene 1: Ausführung

Diese Ebene kann auch als physische Ebene interpretiert werden, da hier die physischen Prozesse des Materialflusses mit den Prozessen des Informationsflusses verknüpft werden. Folglich muss mindestens ein Informationsflussteilnehmer dieser Ebene direkt an der physischen Wertschöpfung und folglich am Materialfluss beteiligt sein.

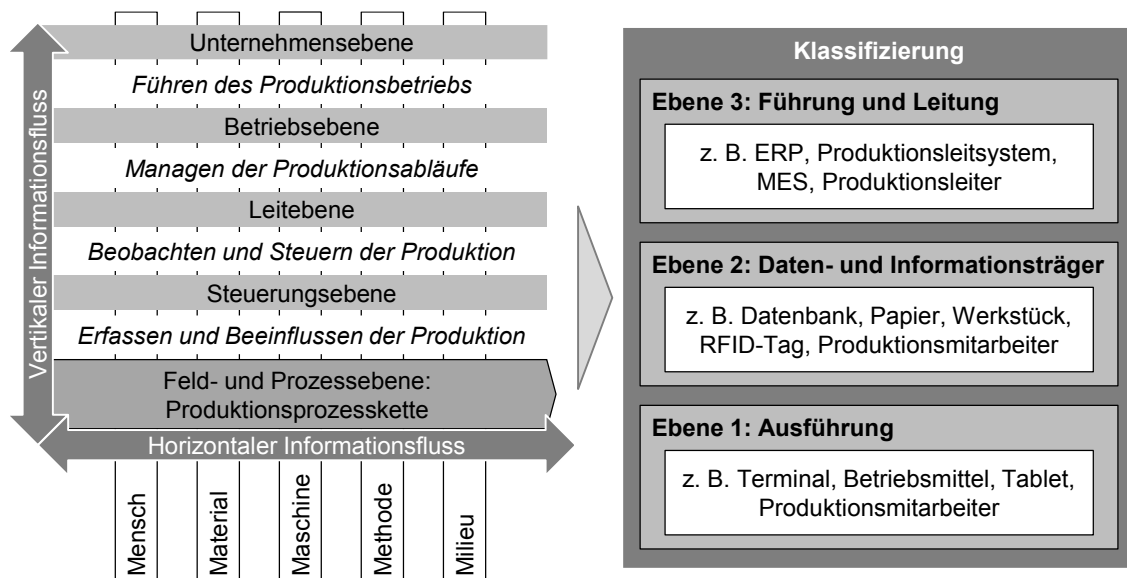


Abbildung 5.1: Entwickelte Klassifizierung von Informationsflussteilnehmern (in Anlehnung an VDI 2870-2, DIN EN 62264-1, SIEPMANN 2016, ARNOLD & FURMANS 2019)

Informationsflussteilnehmer sind entsprechend ihren Tätigkeiten den jeweiligen Ebenen zuzuordnen. Somit können einzelne Informationsflussteilnehmer mindestens einmal und maximal dreimal in der Klassifizierung aufgeführt werden. Die entwickelte Klassifizierung soll anteilig eine Formalisierung von Informationsflussteilnehmern sowie digitalen Technologien in Bezug auf das jeweilige Prozessspektrum unterstützen. Im Folgenden werden Transformationsarten und Funktionen, die von Informationsflussteilnehmern ausgeübt werden können, identifiziert und beschrieben. Die Transformationsarten und Funktionen sollen für eine weiterführende Formalisierung hinsichtlich prozessualer Auswirkungen Anwendung finden.

### 5.2.3 Transformationsarten von Daten und Informationen

DANGELMAIER (2009) unterscheidet Transformation in Produktionsprozessen nach Zustand, Zeit und Ort. Diese Unterscheidung lässt sich auf Transformationsprozesse hinsichtlich des Produktionsfaktors Information übertragen. In Bezug auf Informationen werden bei der *Zustandstransformation* Informationen mit einem veränderten Informationsgehalt bzw. einem veränderten Aggregatzustand generiert. In diesem Zusammenhang werden Daten oder Informationen aus mehreren Quellen beispielsweise mittels Algorithmen hinsichtlich ihrer Aussagekraft angereichert oder Informationen in Teilinformationen zerlegt. Demgegenüber werden Informationen bei einer *Zeittransformation* temporär gespeichert und bei einer *Ortstransformation* über physische Distanzen hinweg übermittelt (LIPSMEIER ET AL. 2018). Des Weiteren lassen sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Übertragung von Informationen zwischen Informationsflussteilnehmern weitere Transformationsarten ableiten. Informationen können implizit (z. B. in den Köpfen der Mitarbeiter), physisch (z. B. auf Papier) oder digital (z. B. in einer Datenbank) vorliegen. Ergänzend zu dem Verständnis von LIPSMEIER ET AL. (2018) sollen daher auch die Übertragung von Informationen zwischen Informationsflussteilnehmern als Transformationsprozesse verstanden werden, da hier beispielsweise bedingt durch Medienbrüche Transformationsprozesse vorliegen können. Demnach werden neben den abgeleiteten Transformationsarten für Informationen hinsichtlich Zustand, Zeit und Ort die weiteren Transformationsarten *digitalisierende*, *analogisierende* und *neutrale Transformation* definiert. Für digitalisierende Transformation steht hierbei der Übergang von inhärent oder physisch vorliegenden Daten und Informationen in eine digitale Form. Als analogisierende Transformation wird entsprechend der inverse Vorgang verstanden. Demgegenüber liegt eine neutrale Transformation vor, wenn zwar ein Übergang zwischen Informationsflussteilnehmern vorliegt, jedoch der Zustand von Daten und Informationen in digitaler oder analoger Form erhalten bleibt. Stellvertretend für die Transformationsarten werden im Folgenden die in Abbildung 5.2 dargestellten Symbole eingeführt.

Transformationsarten						
	Zustand	Ort	Zeit	Neutral	Analogisierend	Digitalisierend
Symbol						

Abbildung 5.2: Symbole zur Beschreibung der Transformationsarten im Informationsfluss

### 5.2.4 Identifikation von Funktionen des Informationsflusses

Die Definition des Begriffs Funktion ist kontextabhängig. Im Kontext der vorliegenden Arbeit beschreibt eine Funktion eine „zu leistende Aufgabe“ (DUDEN 2017) im Hinblick auf ihren Informationsfluss. Die Bestandteile von Informationssystemen können diese Aufgaben durch die Ausübung der Funktionen des Informationsflusses adressieren. In Bezug auf Abläufe in der Produktion nehmen die Informationsflussteilnehmer eines Informationssystems durch ihre jeweiligen Funktionen Einfluss auf die entsprechenden Prozesse des Informationsflusses. Digitale Technologien als Teilmenge eines Informationssystems können hierbei Verwendung finden, um spezifische Funktionen und Arbeitsoperationen des Informationsflusses durchzuführen (MEUDT ET AL. 2017B). Diese Einflussnahme auf Prozesse des Informationsflusses ist von der jeweiligen Ausprägung und Implementierung digitaler Technologien abhängig. Die hergeleiteten Funktionen der Informationsflussteilnehmer sind *Erzeugen*, *Speichern*, *Verarbeiten*, *Übermitteln*, *Übertragen* und *Bereitstellen* (HOELLTHALER ET AL. 2020). Um insbesondere den Bezug zu digitalen Technologien als Teilmenge von Informationsflussteilnehmern herzustellen, werden die Funktionen nachfolgend hinsichtlich des Anwendungsbezugs zu digitalen Technologien erläutert, ohne jedoch den Bezug zu analogen Informationsflussteilnehmern auszuschließen.

Produktionsabläufe führen zu Veränderungen geometrischer, physikalischer bzw. chemischer Größen von Produkten. Werden die jeweils aktuellen Zustände dieser Größen z. B. durch digitale Technologien erfasst, erfolgt hierdurch das *Erzeugen* von Daten und Informationen (MEUDT ET AL. 2017B, LIPSMEIER ET AL. 2018). Inhärent zur Funktion des Erzeugens erfolgt das Akquirieren erzeugter Daten und Informationen. Das Erfassen erzeugter Daten und Informationen kann über unterschiedliche Kanäle realisiert werden. Um vom Menschen erzeugte Daten und Informationen zu Produktionsabläufen zu erfassen, eignen sich multimodale Kanäle wie beispielsweise Eingabegeräte, Sprach- oder Gestenerkennung (GORECKY ET AL. 2014, LEWIN ET AL. 2017, RICHTER 2018). Durch diese Kanäle lassen sich auch Zustände und Fortschritte hinsichtlich der Auftragsabwicklung erfassen und die Daten und Informationen in einen digitalen Zustand transformieren. Neben der Erfassung von Daten und Informationen durch den Menschen kann eine automatisierte Erfassung durch Sensorik erfolgen, indem Parameter der Eingangskontrolle, Prozesskontrolle oder Ausgangskontrolle aufgenommen werden (VDI & NAMUR 2015). Ziel ist es hierbei, durch Sensoren analoge physikalische oder chemische Größen prozessbegleitend und ohne Zeitverzögerung zu messen und auf dieser Grundlage in einen digitalen Zustand zu überführen (GASCH ET AL. 2009, ROY 2017).

Erzeugte und akquirierte Daten und Informationen in digitaler Form sind in einem weiteren Schritt entsprechend zu verwahren. Als weitere Funktion ist daher das *Speichern* aufzuführen. Hierbei lassen sich gesammelte Daten und Informationen über zeitliche Verschiebungen im Sinne einer Zeittransformation hinweg verwahren (BAUERNHANSL 2017, LIPSMEIER ET AL. 2018). Werden Daten und Informationen für die operative Auftragsabwicklung auf dem Shopfloor benötigt, sind sie für eine weitere Verwendung schnell und bedarfsgerecht verfügbar und können über geeignete Technologien ausgelesen werden (GEISBERGER & BROY 2012, MORTENSON ET AL. 2015, HENTSCHEL & LEYH 2016).




Die Fähigkeiten Daten und Informationen zu Informationen mit einer veränderten Aussagekraft zu erzeugen, beschreibt eine den Materialfluss begleitende Prozesskette des Informationsflusses. Das *Verarbeiten* digital vorliegender Daten und Informationen kann hierbei durch digitale Technologien erfolgen. Dadurch lassen sich betrachtete Daten und Informationen, die aus mehreren Quellen stammen und unterschiedlich sein können, im Sinne einer Zustandstransformation kombinieren und verdichten. In diesem Zusammenhang kann der Informationsgehalt erhöht, aber auch reduziert werden (HENTSCHEL & LEYH 2016, LIPSMEIER ET AL. 2018). Hierbei können Daten und Informationen durch Algorithmen aggregiert, analysiert und interpretiert werden (WÖLFLE 2014, LEWIN ET AL. 2017). Werden Daten und Informationen mittels stochastischer und quantitativer Analyseverfahren sowie mit erforschenden und vorhersagenden Modellen verarbeitet, um Entscheidungen und Handlungen herbeizuführen, wird dies als Analytik bezeichnet (DAVENPORT & HARRIS 2017). Einschlägige Literatur klassifiziert hierbei nach den Ausbaustufen beschreibende, diagnostizierende, vorhersagende, präskriptive und autonome Analytik. Über diese Stufen nehmen sowohl die Komplexität verwendeter Software als auch die realisierbaren Potenziale zu (HU ET AL. 2014, SHOA ET AL. 2014, DAVENPORT & HARRIS 2017). Diese Vorgänge entsprechen ebenso einer Zustandstransformation von Daten und Informationen. Zum Verarbeiten ist auch das Koordinieren von Daten und Informationen zu zählen, indem die Elemente des Informationsflusses gemäß informationslogistischen Zielsetzungen gesteuert werden (KRÄMER 2002).

Durch den Einsatz digitaler Technologien wird das uni- und bidirektionale *Übermitteln* von Informationen in Echtzeit ermöglicht (LEWIN ET AL. 2017, HARTMANN ET AL. 2018A). Die Übermittlung ist Befähiger der Ortstransformation, da Informationen über physische Distanzen hinweg übertragen werden können, jedoch ohne dass die Informationen einer Veränderung unterzogen werden (LIPSMEIER ET AL. 2018).

Entgegen dem Übermitteln adressiert das *Übertragen* von Daten und Informationen ihren Wechsel zwischen Informationsflussteilnehmern. Die Informationsflussteilnehmer eines Produktionsprozesses sind hierbei alle Menschen, Maschinen, Produkte, Objekte oder Informationsflussteilnehmer eines Informationssystems. In Abhängigkeit der in der Übertragung involvierten Informationsflussteilnehmer kann eine neutrale, analogisierende oder digitalisierende Transformation vorliegen.

Der Produktionsfaktor Informationen ist für die Durchführung von Produktionsprozessen erforderlich. Erfolgt an physischen Ressourcen wie Menschen, Maschinen, Betriebsmitteln, Werkzeugen oder Produkten das *Bereitstellen* von Informationen, so können diese für die Durchführung wertschöpfender Prozesse eingesetzt werden. Werden Informationen an Maschinen bereitgestellt, sollen diese in digitaler Form erhalten bleiben, wenn sie beispielsweise direkt für die entsprechenden Steuerungen automatisierter Maschinen zur Verfügung gestellt werden (FURRER 2017). Bei einer Bereitstellung für Menschen sind Medien so zu wählen, dass die zur Prozessdurchführung erforderlichen Informationen unter ergonomischen Gesichtspunkten verständlich und eingängig aufbereitet sind sowie mit geringem kognitiven Aufwand schnell aufgenommen werden können (GÜNTNER ET AL. 2014, WÖLFLE 2014, RICHTER 2018). Menschen können dadurch die erforderlichen Informationen bereitgestellt bekommen, die zur Erledigung von Arbeitsvorgängen erforderlich sind (TEUBNER ET AL. 2017). Hierbei können Informationen über multimodale Kanäle wie optisch, akustisch oder haptisch bereitgestellt werden (LEWIN ET AL. 2017). Detaillierte Gestaltungsleitfäden zu den jeweiligen Kanälen können der Normenreihe zur DIN EN ISO 9241-1 entnommen werden.

Die Funktionen des Informationsflusses werden im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit anhand der in Abbildung 5.3 dargestellten Symbole repräsentiert.

Funktionen						
	Erzeugen	Speichern	Verarbeiten	Übermitteln	Übertragen	Bereitstellen
Symbol						

*Abbildung 5.3: Symbole zur Beschreibung der Funktionen des Informationsflusses*

### 5.2.5 Schematisierung von informationsflussorientierten Wertströmen

Die in den beiden vorhergehenden Abschnitten 5.2.3 und 5.2.4 dargestellten Transformationsarten und Funktionen beschreiben, wie Informationsflussteilnehmer bzw. digitale Technologien auf Prozesse des Informationsflusses und folglich auf die Informationslogistik einwirken können. Diese Transformationsarten und Funktionen sollen primär der Beschreibung von Prozessen des Informationsflusses dienen und zugleich für eine Schematisierung von digitalen Technologien verwendet werden können. Mittels der Transformationsarten und Funktionen sollen sich demnach digitale Technologien hinsichtlich ihrer wesentlichen Merkmale und Fähigkeiten, wie sie Prozesse des Informationsflusses in Wertströmen verändern und gestalten können, beschreiben lassen. Nachfolgend ist eine geeignete Art der Modellierung zu entwickeln, die sowohl die erstellte Klassifizierung als auch die Spezifizierung von Prozessen des Informationsflusses hinsichtlich Transformationsarten und Funktionen in Wertströmen unterstützt. Im Stand der Forschung wurden im Zusammenhang mit der Modellierung von Material- und Informationsflüssen unterschiedliche Ansätze zur Abbildung der Material- und Informationsflüsse von Wertströmen vorgestellt und Defizite herausgestellt (vgl. Abschnitt 2.5.2). Die Modellierung von Material- und Informationsflüssen durch BPMN wurde hierbei mehrfach aufgeführt und im Zuge dessen ihre grundsätzliche Eignung zur Abbildung von Wertströmen bestätigt. Die BPMN ist eine von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) weltweit normierte Methode zur Abbildung und Ausführung von Prozessen, welche die Darstellung fachlicher und technischer Aspekte sowie organisatorischer Verantwortlichkeiten unterstützt (BRAUN & ESSWEIN 2014A, GADATSCH 2017, FLEISCHMANN ET AL. 2018). Die aufgeführten Punkte begünstigen eine weitere Verwendung von BPMN im Sinne der Nachhaltigkeit der im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu entwickelnden Methodik.

Um komplexe Prozessstrukturen zu veranschaulichen, konzentriert sich die BPMN auf die kontrollflussorientierte Modellierung von Prozessen, um die zeitlich logische Folge durchzuführender Prozesse abzubilden (OMG 2013, BRAUN & ESSWEIN 2014B, GADATSCH 2017, FREUND & RÜCKER 2019, OBERMAIER ET AL. 2019). BPMN ist im Kontext des Informationsmanagements eine für Anwender einfach lesbare Notation, die bei der Verbesserung der Prozesse einer Organisation insbesondere in den Phasen der Prozessanalyse und des Prozessdesigns geeignet ist (DECKER & PUHLMANN 2007, BOCCIARELLI & D'AMBROGIO 2011, KRCCMAR 2015B).

Die Erweiterungen und Anpassungen der Wertstrommethode erfolgen in der vorliegenden Arbeit vorrangig bezüglich Prozessen des Informationsflusses in Anlehnung

an die BPMN. Da sie in wechselseitiger Beziehung zu Prozessen des Materialflusses stehen, sollen auch diese Prozesse abgebildet werden können. Insbesondere sollen jedoch die Prozesse des Informationsflusses analysiert und designt werden können, wofür eine detaillierte Darstellungsmöglichkeit der Prozesse und ihrer wertstrombezogenen Zusammenhänge vorteilhaft ist. Basierend darauf soll eine nachgelagerte Implementierung betrachteter digitaler Technologien erleichtert werden, da durch das Analysieren und das Designen Beschreibungen der prozessualen Integration digitaler Technologien entwickelt werden können.

Aufbauend auf den Notationsvorgaben der BPMN<sup>8</sup> und der Wertstrommethode werden in Abgrenzung zum Stand der Forschung nachstehend die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgenommenen Erweiterungen und Anpassungen vorgestellt. Hierdurch erfolgt die Schematisierung von Prozessen des Informationsflusses, wobei ihre Beziehungen zu Prozessen des Materialflusses zu berücksichtigen sind. Dies erfolgt unter Einbindung der entwickelten Klassifizierung sowie den Transformationsarten und Funktionen von Informationsflussteilnehmern.

Um Wertströme informationsflussorientiert und unter Berücksichtigung der Prozesse des Materialflusses detailliert und gesamtheitlich analysieren und designen zu können, soll die Abbildung von Wertströmen auf zwei Detaillierungsebenen erfolgen. Auf Mikroebene erfolgt eine detaillierte Abbildung der Abläufe einzelner Produktionsprozesse und auf Makroebene werden die übergeordneten Zusammenhänge der gesamten Produktionsprozesskette aufgezeigt. Nachfolgend wird zunächst der Aufbau der Mikroebene und anschließend der Aufbau der Makroebene beschrieben.

Auf Mikroebene werden die Ebenen 1, 2 und 3 der Klassifizierung über Pools abgebildet. Die jeweiligen Pools fassen die den Ebenen zugehörigen Informationsflussteilnehmer zusammen. Hierbei können Informationsflussteilnehmer in Abhängigkeit ihrer individuellen Einbindung und Tätigkeiten auch mehreren Pools bzw. Ebenen zugewiesen werden (vgl. Abschnitt 5.2.2). Den Informationsflussteilnehmern werden innerhalb der Pools horizontal verlaufende Lanes zugewiesen, über welche die jeweilige Einbindung der Informationsflussteilnehmer abgebildet werden kann. Zwischen den einzelnen Lanes bzw. den Informationsflussteilnehmern liegen Schnittstellen, die das Übertragen von Informationen zwischen Informationsflussteilnehmern verdeutlichen. Während Ebene 2 zur Einbindung ihrer Informationsflussteilnehmer im Wertstrom verwendet wird, können in den Ebenen 1 und 3 darüber hinaus Prozesse des

---

<sup>8</sup> Für detaillierte Informationen zur Business Process Model and Notation sei auf einschlägige Literatur verwiesen (z. B. OMG 2013 oder FREUND & RÜCKER 2019).

Informationsflusses abgebildet werden. Des Weiteren erfolgt in Ebene 1 über die Berücksichtigung von Prozessen des Materialflusses die Kopplung zu den physischen Abläufen in der Produktion. Abbildung 5.4 führt die entwickelte Schematisierung auf Mikroebene zusammenfassend auf und verdeutlicht, wie betrachtete Abläufe zu spezifizieren sind.

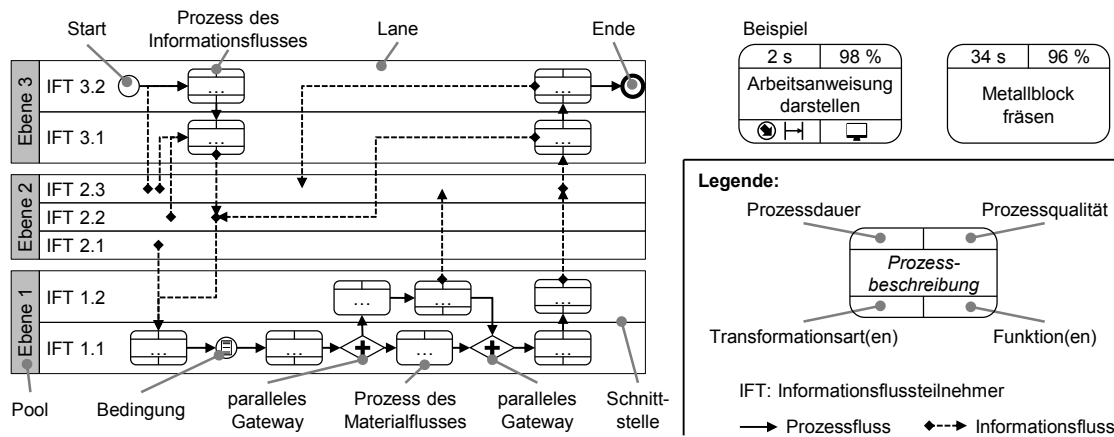


Abbildung 5.4: Schematisierung von Wertströmen auf Mikroebene am Beispiel eines Produktionsprozesses PP<sub>2</sub>

Darüber hinaus können ergänzend Bedingungen für weitere Spezifizierungen der Abläufe verwendet oder Verzweigungen im Prozessfluss durch Gateways abgebildet werden. Die Informationsflussteilnehmer haben hierbei alleinig die Kontrolle und Verantwortung für die in ihren Lanes abgebildeten Prozesse. Für eine Interaktion mit anderen Prozessen müssen die Informationsflussteilnehmer Informationen mit anderen Informationsflussteilnehmern austauschen. Über die Ebene 2 sind hierfür die Daten- und Informationsträger zentral zwischen den Ebenen 1 und 3 angeordnet. Die Informationsflussteilnehmer der Ebene 2 können über entsprechende Informationsflusspfeile mit den jeweiligen Prozessen verbunden werden.

Um die hierarchische Zuordnung sowie synchrone Abbildung der Abläufe zwischen Mikro- und Makroebene sicherzustellen, werden die auf Mikroebene abgebildeten Informationsflussteilnehmer sowie die zugehörigen Informationsflüsse ebenso auf Makroebene zusammenfassend abgebildet. Die Abbildung der Informationsflüsse im Vergleich zur ursprünglichen Modellierung der Wertstrommethode wird somit auf der Makroebene um den entwickelten BPMN-basierten Ansatz erweitert, was in Abbildung 5.5 veranschaulicht ist.



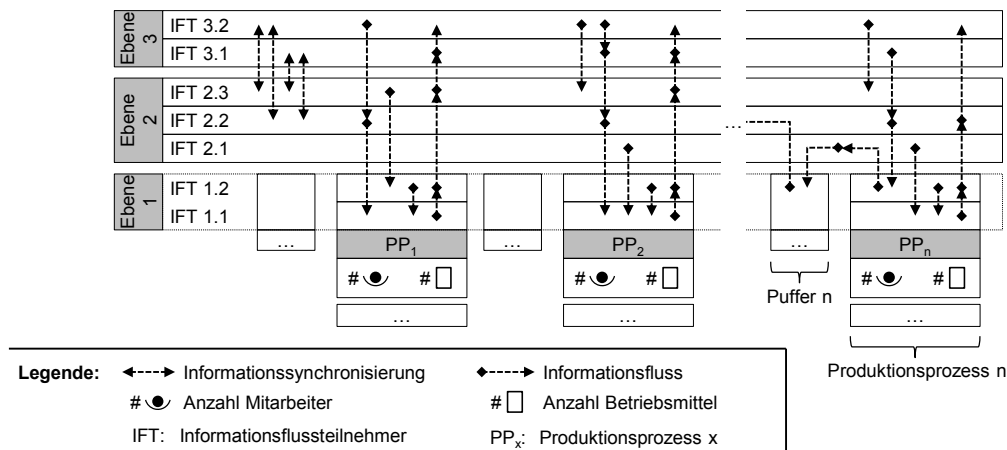


Abbildung 5.5: Schematisierung von Wertströmen auf Makroebene

### 5.2.6 Parameter des informationsflussorientierten Wertstroms

Aufbauend auf der Schematisierung von informationsflussorientierten Wertströmen werden nachstehend die für die Modellierung der Wertströme einer Produktionsprozesskette notwendigen Parameter in Bezug auf Produktionsprozesse, Puffer sowie Transport beschrieben. Im Zuge dessen werden die in diesem Rahmen erforderlichen Zeit- und Qualitätsverluste eingeführt.

Zunächst wird auf Tagesbedarf (TB), Taktzeit (TZ), Bearbeitungszeit (BZ), Prozesszeit (PZ), Rüstzeit (RZ) und Zykluszeit (ZZ) eingegangen (vgl. Abbildung 5.6).

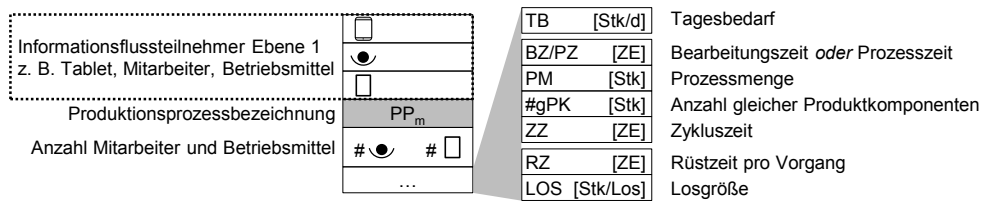


Abbildung 5.6: Grundlegende Parameter zu Produktionsprozessen

Der Tagesbedarf lässt sich aus dem Quotienten von Kundenbedarf und der Anzahl an Arbeitstagen einer betrachteten Zeitspanne ermitteln. Der Kundentakt ist elementar für die Bestimmung der Taktzeit, die für die Ausführung der Arbeitsumfänge zu den jeweils erforderlichen Zykluszeiten der einzelnen Produktionsprozesse zur Verfügung steht (STADTLER 2008). Die Zykluszeit beschreibt hierbei die Zeitdauer, nach der ein Produktionsprozess ein Produkt fertigstellt und hervorbringt. Der Produkti-

onsprozess mit der längsten Zykluszeit bestimmt in der Regel die Taktzeit der Produktionsprozesskette (GLONEGGER 2014). Die Zykluszeit ist hierbei eine Kennzahl der Prozessleistung, die sich aus den messbaren Werten zu Bearbeitungs- und Rüstzeit sowie Anzahl der Betriebsmittel und gleicher Produktkomponenten berechnen lässt. Falls es sich um einen Durchlauf- oder Chargenprozess handelt, so wird die Bearbeitungszeit unter Berücksichtigung der Prozessmenge als Prozesszeit bezeichnet (ERLACH 2010). Im Folgenden werden zunächst die Bearbeitungs-, Prozess- und Rüstzeit beschrieben, ehe die Berechnung der Zykluszeit dargestellt wird.

Die Bearbeitungszeit umfasst die (Teil-)Arbeitsvorgänge des Mitarbeiters und die Laufzeit des Betriebsmittels, um in einem Produktionsprozess ein Produkt vollständig zu bearbeiten, bevor es zum nächsten Produktionsprozess weitergegeben wird. Die Arbeitsvorgänge des Mitarbeiters setzen sich aus wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Zeitanteilen zusammen, wenn beispielsweise nach dem Aufspannen von Produkten auf Betriebsmitteln ablaufbedingte Wartezeiten entstehen. Demgegenüber können bei Betriebsmitteln neben wertschöpfenden Nutzungszeiten auch ablaufbedingte Brachzeiten vorliegen, wenn beispielsweise Produkte auf das Betriebsmittel aufgespannt, Bearbeitungsprogramme von Mitarbeitern eingegeben oder Informationen zu durchgeführten Prüfvorgängen von Mitarbeitern dokumentiert werden. Abbildung 5.7 fasst die geschilderten Zusammenhänge bezüglich der Bearbeitungszeit zusammen.

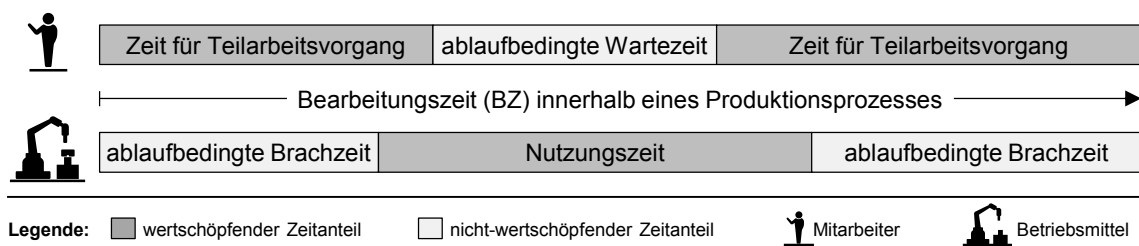


Abbildung 5.7: *Bearbeitungszeit von Mitarbeiter und Betriebsmittel (in Anlehnung an ERLACH 2010 nach REFA 1992)*

Die Verweildauer von Produkten in einem Produktionsprozess wird auch als Prozesszeit bezeichnet. Bearbeitungs- und Prozesszeit sind identisch, falls genau ein Produkt mit einer Prozessmenge (PM) von eins in einem Produktionsprozess bearbeitet wird (ERLACH 2010), wie in Formel (5.1) aufgezeigt wird.

$$PZ = BZ \cdot PM \quad (5.1)$$

mit PZ Prozesszeit  
 BZ Bearbeitungszeit  
 PM Prozessmenge im Durchlauf- oder Chargenprozess

Befinden sich mehrere Produkte zeitgleich in einem Produktionsprozess, so ist zwischen Durchlauf- und Chargenprozessen zu unterscheiden. Während bei Durchlaufprozessen Produkte einzeln zu- und abgeführt werden, werden in Chargenprozessen zu Losen zusammengefasste Produkte zeitgleich bearbeitet. Die Prozessmenge beschreibt hierbei die Anzahl an Produkten, die zeitgleich bearbeitet werden. In diesem Zusammenhang liegt zudem Rüstzeit vor, wenn zwischen herzustellenden Losen (LOS) produktvariantenbedingte Zeiten für einen Wechsel beispielsweise von Werkzeugen, Vorrichtungen oder Materialien anfallen, in denen Betriebsmittel für eine Bearbeitung von Produkten nicht verfügbar sind. Die folgende Abbildung 5.8 führt die beschriebenen Zeitparameter inklusive der Zykluszeit, deren Berechnung nachstehend erläutert wird, zusammenfassend auf.

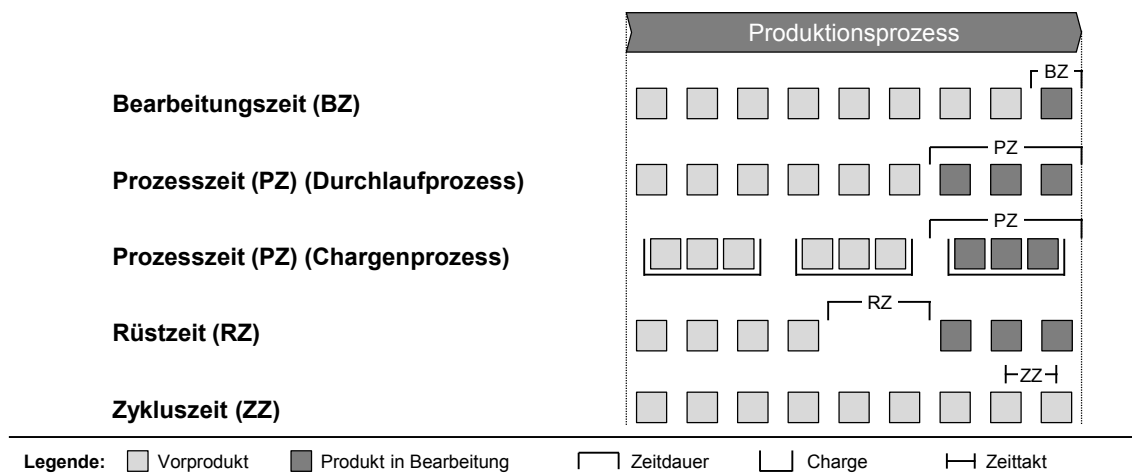


Abbildung 5.8: Zeitparameter (in Anlehnung an ERLACH 2010)

Die Zykluszeit beschreibt das Kapazitätsangebot eines Produktionsprozesses. Sie ist abhängig von der Anzahl gleicher Produktkomponenten (#gPK), der Prozessmenge und der Anzahl an Betriebsmitteln (#BM), was in Formel (5.2) verdeutlicht wird (ERLACH 2010).

$$ZZ = \frac{BZ \cdot \#gPK}{\#BM} \quad \text{oder} \quad ZZ = \frac{PZ \cdot \#gPK}{PM \cdot \#BM} \quad (5.2)$$

mit ZZ Zykluszeit  
 #gPK Anzahl gleicher Produktkomponenten  
 #BM Anzahl Betriebsmittel

Die in einer Fließproduktion verketteten Produktionsprozesse eines Wertstroms sind im Idealfall durch eine gleichmäßige Verteilung der Arbeitsumfänge zeitlich synchronisiert bzw. ausgetaktet, sodass fertiggestellte Produkte des einen Produktionsprozesses unmittelbar an den nächsten Produktionsprozess nach der Taktzeit weitergeleitet werden können (PONNAMBALAM ET AL. 1999, BRENNER 2016). Ziel der Aus-taktung ist es, eine hohe Auslastung von Produktionsprozessen zu erreichen. Jedoch erschweren die unterschiedlichen Umfänge der Arbeitsvorgänge bzw. Teilarbeitsvor-gänge zur Bearbeitung verschiedener Produkte und Produktvarianten eine ideale Aus-taktung verketteter Produktionsprozesse. In diesem Zusammenhang wird die resul-tierende zeitliche Differenz von den erforderlichen Teilarbeitsvorgängen eines Pro-duktionsprozesses zur Taktzeit als Taktausgleich bezeichnet. Taktausgleiche sind im Sinne einer hohen Auslastung möglichst gering zu halten (ROSCHER 2008). Um auf-tretende Taktausgleiche reduzieren zu können, soll im Rahmen der vorliegenden Ar-beit neben einer für die gesamte Produktionsprozesskette geltenden Taktzeit eine va-riable Taktung der Produktionsprozesse betrachtet werden können (vgl. Abbildung 5.9).

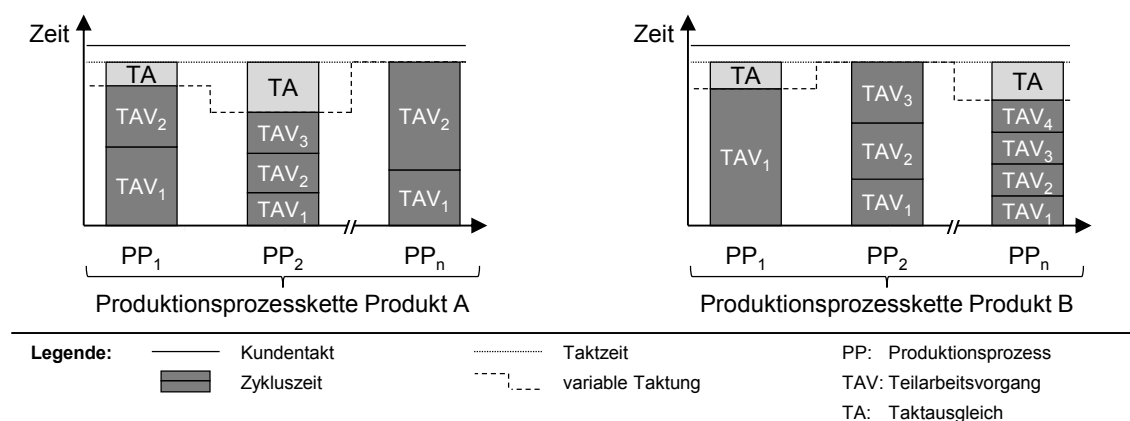


Abbildung 5.9: Feste Taktzeit und variable Taktung einer Produktionsprozesskette (in Anlehnung an ROSCHER 2008)

Für die zeitliche Entkopplung zwischen verketteten Produktionsprozessen sind Puffer erforderlich. Für den Fall einer variablen Taktung soll im Mittel über den Wechsel herzustellender Produktvarianten eine gleichmäßige Auslastung der einzelnen Produktionsprozesse im Sinne einer Produktionsnivellierung erreicht werden.

Um eine weitere Spezifizierung von Produktionsprozessen in Bezug auf informationsbedingte Einflüsse zu ermöglichen, sollen diese anhand von Zeitverlusten (ZV) und Qualitätsverlusten (QV) näher beschrieben werden. Treten derartige Verluste auf, so mindern diese entsprechend die Verfügbarkeit, Leistung oder Qualität des jeweiligen Produktionsprozesses. Sie orientieren sich an den Bestandteilen zur Bestimmung des Produktivitätsgrads (vgl. Abbildung 2.7 in Abschnitt 2.2.3). Darüber hinaus gilt es, zu jedem Produktionsprozess die Ausprägung von Qualitätsgrad, Produktivitätsgrad sowie Every Part Every Interval zu erheben. Abbildung 5.10 zeigt die entsprechende Darstellung eines Produktionsprozesses unter Berücksichtigung der aufgeführten Parameter. Eine nähere Beschreibung der Verluste erfolgt im Rahmen der Entwicklung des System-Dynamics-Modells (vgl. Abschnitt 5.4.6).

Informationsflussteilnehmer Ebene 1 z. B. Tablet, Mitarbeiter, Betriebsmittel	☐ ● ☐
Produktionsprozessbezeichnung	PP <sub>m</sub>
Anzahl Mitarbeiter und Betriebsmittel	# ● # ☐
Tagesbedarf	TB [Stk/d]
Bearbeitungszeit <i>oder</i> Prozesszeit	BZ/PZ [ZE]
Prozessmenge	PM [Stk]
Anzahl gleicher Produktkomponenten	#gPK [Stk]
Zykluszeit	ZZ [ZE]
Rüstzeit pro Vorgang	RZ [ZE]
Losgröße	LOS [Stk/Los]

ZV <sub>P</sub>	ZV <sub>oA</sub>	ZV <sub>W</sub>	ZV <sub>IS</sub>
ZV <sub>AL</sub>	ZV <sub>R</sub>	ZV <sub>K</sub>	ZV <sub>L</sub>
ZV <sub>oSV</sub>	ZV <sub>oSn</sub>	ZV <sub>A</sub>	QV <sub>PA</sub>
QV <sub>AA</sub>	QG	PG	EPEI

ZV <sub>P</sub>	Zeitverlust durch Pausen [ZE/d]
ZV <sub>oA</sub>	Zeitverlust durch fehlende Aufträge [ZE/d]
ZV <sub>W</sub>	Zeitverlust durch Wartung [ZE/d]
ZV <sub>IS</sub>	Zeitverlust durch technische Störung [ZE/d]
ZV <sub>AL</sub>	Zeitverlust durch Anlauf [ZE/d]
ZV <sub>R</sub>	Zeitverlust durch Rüsten [ZE/d]
ZV <sub>K</sub>	Zeitverlust durch Kurzstillstand [ZE/d]
ZV <sub>L</sub>	Zeitverlust durch Langsamlauf [ZE/d]
ZV <sub>oSV</sub>	Zeitverlust durch organisatorische Störung vorgelagert [ZE/d]
ZV <sub>oSn</sub>	Zeitverlust durch organisatorische Störung nachgelagert [ZE/d]
ZV <sub>A</sub>	Zeitverlust durch Ablaufdefizit [ZE/d]
QV <sub>PA</sub>	Qualitätsverlust durch Produktionsausschuss [Stk/d]
QV <sub>AA</sub>	Qualitätsverlust durch Anlaufausschuss [Stk/d]
QG	Qualitätsgrad [%]
PG	Produktivitätsgrad [%]
EPEI	Every Part Every Interval [d]

Abbildung 5.10: Spezifizierung von Produktionsprozessen

Neben Produktionsprozessen sind in den Wertströmen auch Puffer und Transport zu detaillieren. Diese werden, wie in Abbildung 5.11 aufgeführt ist, dokumentiert und sind nachstehend beschrieben.

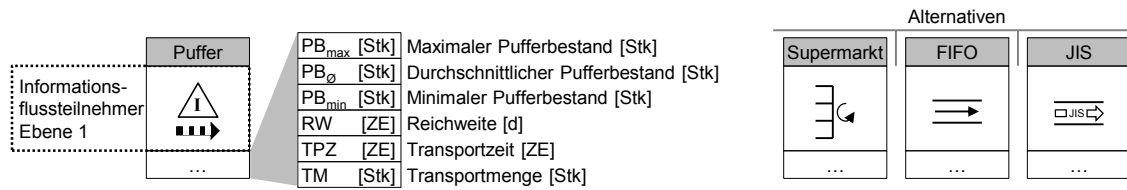


Abbildung 5.11: Grundlegende Parameter zu Puffer und Transport

Da in der Praxis aufgrund der produktbedingten Varianz der Arbeitsumfänge innerhalb einer Produktionsprozesskette von einer idealen und zeitlich an einen Takt gebundenen Synchronisation in der Regel abgewichen wird, erfolgt oftmals eine Entkopplung von Produktionsprozessen mit zwischengeschalteten Puffern (VDI 3649). Puffer nehmen bearbeitete Produkte oder Lose eines Produktionsprozesses auf, ehe diese für ihre Weiterverarbeitung an den nächsten Produktionsprozess weitergegeben werden. Die Weitergabe kann näher spezifiziert werden nach einem Kanban-gesteuerten Supermarkt oder nach den Regeln First In First Out (FIFO) und Just in Sequence (JIS). Diese zeitliche Entkopplung dient dem temporären Überbrücken sowohl von unterschiedlichen Zykluszeiten benachbarter Produktionsprozesse als auch von wahrscheinlichkeitsbehafteten Störzeiten, damit sich Auswirkungen von Störungen nicht direkt innerhalb einer Produktionsprozesskette fortpflanzen (VDI 3649). In Abhängigkeit der zeitlichen Unterschiede der Zykluszeiten und der Dauer von Störzeiten von benachbarten Produktionsprozessen werden Puffer über die Größen maximaler Pufferbestand ( $PB_{max}$ ), durchschnittlicher Pufferbestand ( $PB_0$ ), minimaler Pufferbestand ( $PB_{min}$ ) und Reichweite des Bestandes (RW) beschrieben. Die Reichweite ist die Dauer, mit der sich ein Produkt in einem Puffer befindet, und somit Teil der Durchlaufzeit. Die Reichweite berechnet sich nach Formel (5.3). Unter der Annahme einer ausgesetzten Versorgung des Puffers mit weiteren Produkten aus dem vorgelagerten Produktionsprozess gibt die Reichweite an, wie lange ein Puffer den nachgelagerten Produktionsprozess mit Produkten versorgen kann (ERLACH 2010, WIENDAHL 2010).

$$RW = \frac{PB_0 \cdot QG}{TB \cdot \#gPK} \quad (5.3)$$

mit RW Reichweite  
 PB<sub>0</sub> Durchschnittlicher Pufferbestand  
 TB Tagesbedarf des folgenden Produktionsprozesses

Nach abgeschlossener Bearbeitung müssen Produkte für ihre Weiterbearbeitung vom einen zum nächsten Produktionsprozess transportiert werden. Derartige innerbetriebliche bzw. interprozessuale Transporte zählen zu produktionslogistischen Prozessen (VDI 4400-2). Die Dauer für den Transport von einem Produktionsprozess zum nachgelagerten Puffer bzw. Produktionsprozess wird als Transportzeit (TPZ) bezeichnet. Die Transportzeit hängt von der zurückzulegenden Distanz sowie der Transportgeschwindigkeit ab und zählt zur Durchlaufzeit. Transportzeit liegt zwischen allen Produktionsprozessen vor, da eine ideale logistische Kopplung in Form von einer minimalen Distanz zwischen Produktionsprozessen in der Regel nicht umsetzbar ist. Um logistische Transportaufwände gering zu halten, können auch Lose mit einer definierten Transportmenge (TM) transportiert werden.

### **5.3 Informationsbezogene Gestaltung von Wertströmen**

#### **5.3.1 Allgemeines**

Um eine informationsbezogene Gestaltung von Wertströmen durchzuführen, bedarf es zunächst der Beschreibung einer allgemeinen Zielsetzung, wonach Informationsfluss und Informationslogistik eines Informationssystems unter Berücksichtigung des Materialflusses auszurichten sind (Abschnitt 5.3.2). Darauf aufbauend werden informationsbedingte Verschwendungsarten hergeleitet, um die der Zielsetzung entgegenstehenden Gegebenheiten eines Wertstroms identifizieren zu können (Abschnitt 5.3.3). Abschließend erfolgt die Herleitung informationsbezogener Gestaltungsansätze, die zur Behebung identifizierter Verschwendung angewendet werden können (Abschnitt 5.3.4).

#### **5.3.2 Zielsetzungen von Informationsfluss und Informationslogistik**

Prozesse des Informationsflusses sind mit Prozessen des Materialflusses gekoppelt bzw. haben Auswirkungen auf diese. Folglich kann die Informationslogistik durch Planung, Steuerung und Überwachung von Informationsflüssen Einfluss auf die zugehörigen Materialflüsse nehmen. Zentrale Fragestellung von Zielsetzungen des Informationsflusses und der Informationslogistik ist es daher, wie Informationsflüsse gestaltet werden müssen, um möglichst positive Effekte auf den zugehörigen Materialfluss zu bewirken. In Anlehnung an die Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme sind positive Effekte beim Adressieren zeit- und qualitätsorientierter Gesichtspunkte zu erwarten, wenn insbesondere Zeit- und Qualitätsverluste reduziert

werden. Da Effekte auf Zielgrößen hinsichtlich Flexibilität und Wirtschaftlichkeit aus veränderten zeit- und qualitätsorientierten Größen resultieren, sind diese dadurch implizit berücksichtigt. Übergeordnete Zielsetzung von Informationsflüssen und der Informationslogistik ist es daher, Prozesse und Abläufe, die von den Informationsflussteilnehmern realisiert werden, anhand zeit- und qualitätsbezogener Kriterien auszurichten.

Hinsichtlich zeitorientierter Gesichtspunkte kann die Dauer der entsprechenden Prozesse und Abläufe durch die Transformationsarten und die Funktionen beeinflusst werden. Um im Materialfluss kurze Durchlaufzeiten oder eine hohe Flexibilität zu realisieren, sind die Abläufe des Informationsflusses zeitlich kurz zu gestalten. Demgegenüber gilt es hinsichtlich qualitätsorientierter Gesichtspunkte die Korrektheit der Prozesse und Abläufe des Informationsflusses sicherzustellen. Hierdurch werden Fehler im Informationsfluss unterbunden, damit diese sich nicht negativ in den zugehörigen Materialflüssen fortpflanzen können. Demgegenüber lässt sich bei der Informationslogistik das 6R-Axiom der Logistik auf informationslogistische Zusammenhänge und folglich auf die Abläufe des Informationsflusses übertragen bzw. für den informationslogistischen Kontext adaptieren (JÜNEMANN 1994, KRÄMER 2002, HARTLEIF ET AL. 2017). Die Zielsetzung der Informationslogistik ist demnach die Gestaltung der Informationsflüsse, sodass die richtigen Daten und Informationen zum richtigen Zeitpunkt, am richtigen Ort, in der richtigen Menge, in der richtigen Qualität und in der richtigen Form gehandhabt werden können (HOELLTHALER ET AL. 2020). Ob und in welchem Umfang Informationen in der Anwendung diese informationslogistischen Zielsetzungen erfüllen, hängt jeweils von der spezifischen Nutzung durch die einzelnen Informationsflussteilnehmer und deren zu erfüllenden Aufgaben ab (NOESKE 1999). Eine weitere Zielsetzung der Informationslogistik besteht folglich darin, dass die von den Prozessen des Materialflusses ausgehenden Informationsbedarfe mit einem entsprechenden Informationsangebot unter Berücksichtigung von zeit- und qualitätsorientierten Gesichtspunkten bedient werden. Durch die Informationslogistik sind somit ein Gleichgewicht sowie eine ablauforganisatorische Synchronizität zwischen Informationsbedarf und Informationsangebot von Informationsflussteilnehmern zu gewährleisten. Abbildung 5.12 zeigt die Zielsetzungen von Informationsfluss und Informationslogistik und setzt diese schematisch in Bezug zum Materialfluss. Prozesse des Informationsflusses sind in diesem Kontext verantwortlich für die Effizienz und die Informationslogistik für die Effektivität, um klassische Verschwendung im Materialfluss zu unterbinden.



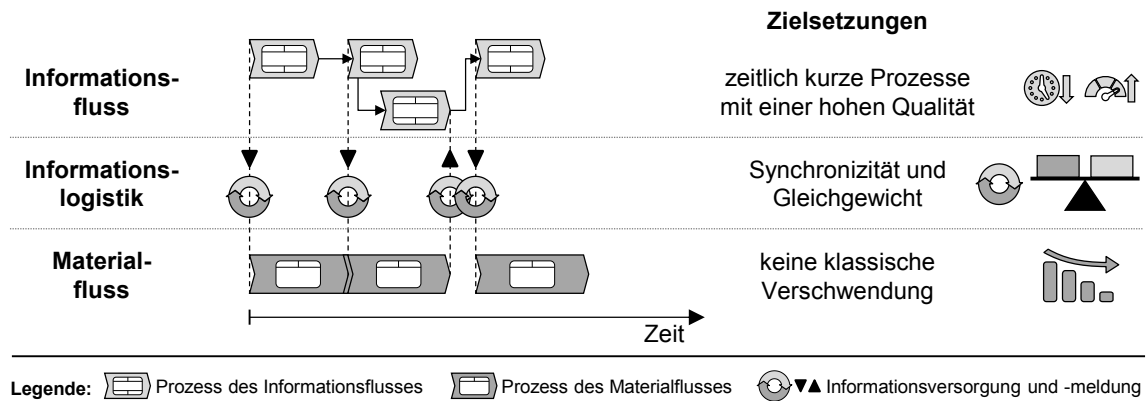


Abbildung 5.12: Zielsetzungen von Informationsfluss, Informationslogistik und Materialfluss

### 5.3.3 Herleitung informationsbedingter Verschwendungsarten

Verschwendungsarten stellen bestimmte Sorten von Verschwendung dar. In Abhängigkeit der Eigenschaften und Merkmale von in Prozessen auftretender Verschwendung lässt sich diese Verschwendung entsprechenden Verschwendungsarten zuordnen. Die sieben klassischen Verschwendungsarten sind in Bezug auf Materialflüsse definiert, ohne dass ihre jeweiligen Ursachen, durch die sie hervorgerufen werden können, allgemein eingegrenzt sind. Demgegenüber liegt bei informationsbedingten Verschwendungsarten eine Eingrenzung betrachteter Ursachen vor, da informationsbedingte Verschwendungsarten diejenigen Sorten von Verschwendung sind, die durch den Produktionsfaktor Information hervorgerufen werden bzw. im Produktionsfaktor Information begründet sind. Folglich können auch Verschwendungen, die klassischen Verschwendungsarten zugeordnet werden, informationsbedingt sein.

Im vorstehenden Abschnitt wurden die Zielsetzungen auf den Ebenen des Informationsflusses und der Informationslogistik allgemein veranschaulicht. Demgegenüber werden nachstehend informationsbedingte Verschwendungsarten hergeleitet, die zum einen Verschwendung in Bezug auf Informationsfluss und Informationslogistik abbilden und zum anderen zu defizitären Abläufen und Problemen im Materialfluss führen können. Die Abbildung 5.13 steht hierbei im Kontrast zur Abbildung 5.12 und zeigt schematisch eine verschwendungsbehaftete Konstellation von Informationsfluss, Informationslogistik und Materialfluss auf.

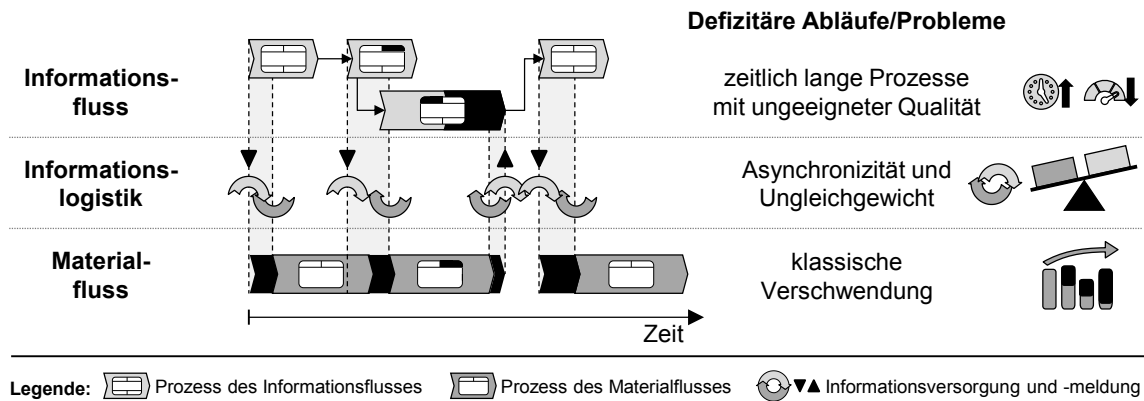
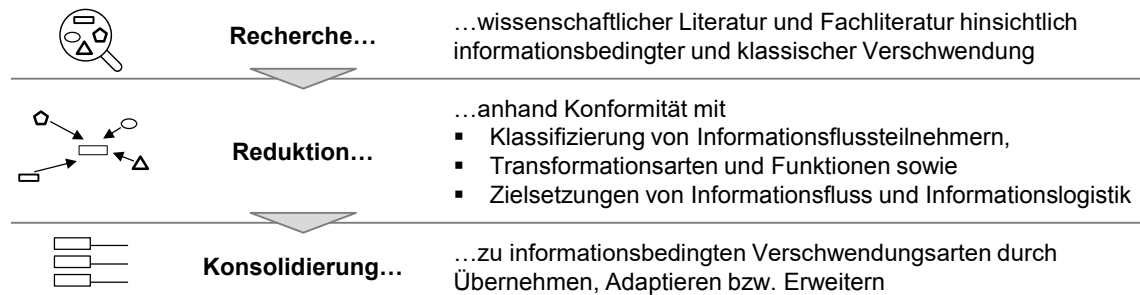


Abbildung 5.13: Schematische Konstellation mit informationsbedingter Verschwendung aufgrund defizitärer Abläufe und Probleme

Defizitäre Abläufe oder Probleme bedingt durch Prozesse des Informationsflusses liegen vor, wenn es sich hierbei um zeitlich lange Prozesse handelt oder diese eine ungeeignete Qualität aufweisen. Derartige zeit- oder qualitätsbedingte Defizite können folglich zu Verschwendung im zugehörigen Materialfluss führen (z. B. Warten des Mitarbeiters auf einen langen Informationsverarbeitungsprozess oder Fehler aufgrund falschen Ablesens der Informationen von handschriftlich ausgefülltem Auftragszettel). Demgegenüber liegt ein Defizit durch Informationslogistik vor, wenn die Prozesse des Informationsflusses nicht geeignet mit den Prozessen des Materialflusses synchronisiert sind oder ein Ungleichgewicht zwischen Informationsbedarf und Informationsangebot vorliegt. Beispielhaft sei an dieser Stelle eine zu späte Informationsbereitstellung aufgeführt, die zu Wartezeit im Produktionsprozess und sich aufbauenden Beständen im vorgelagerten Puffer führen kann.

Das letztgenannte Beispiel verdeutlicht, dass eine eindeutige und allgemeine Zuordnung informationsbedingter Verschwendungen zum Informationsfluss oder zur Informationslogistik nicht möglich ist, sondern von der jeweiligen Problemstellung abhängt. In diesem Beispiel kann die Ursache in einem zu langen Prozess der Informationsübermittlung und -bereitstellung oder in einer zu späten informationslogistischen Bereitstellung der benötigten Informationen liegen. Eine Beschreibung von informationsbedingten Verschwendungsarten kann folglich ohne eine Differenzierung nach Informationsfluss und Informationslogistik vorgenommen werden. Für die Herleitung der informationsbedingten Verschwendungsarten im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird nach dem in Abbildung 5.14 skizzierten Ablauf vorgegangen.



*Abbildung 5.14: Ablauf zur Herleitung informationsbedingter Verschwendungsarten*

Ansätze aus wissenschaftlicher Literatur sowie Fachliteratur werden zunächst recherchiert. Bei der Recherche werden zum einen kontextuelle Ansätze berücksichtigt, die direkten Bezug zum Kontext informationsbedingter Verschwendung in Produktionsprozessen Ganzheitlicher Produktionssysteme herstellen. Zum anderen werden auch weitere Ansätze betrachtet, die andere Schwerpunktsetzungen verfolgen, aber für die Herleitung der informationsbedingten Verschwendungsarten dienlich sind. Anschließend werden die Ansätze anhand ihrer Konformität mit den in den Abschnitten 5.2.2 bis 5.2.4 und 5.3.2 erarbeiteten Kriterien reduziert. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Ansätze in Bezug zur Klassifizierung von Informationsflussteilnehmern, zu den Transformationsarten und Funktionen sowie zu den Zielsetzungen von Informationsfluss und Informationslogistik gesetzt werden können. Abschließend erfolgt in der Konsolidierung das Aufstellen der informationsbedingten Verschwendungsarten, was durch Übernehmen, Adaptieren bzw. Erweitern der betrachteten Ansätze erfolgt.

Bei der Vermeidung von Verschwendung fokussiert der Großteil der Literatur Verschwendung überwiegend einheitlich nach den sieben klassischen Verschwendungsarten von OHNO (2013) (z. B. ERLACH 2010, DOMBROWSKI & MIELKE 2015B, BECKER 2018, SCHRÖDER & TOMANEK 2019). Demgegenüber existieren weitere Ansätze, die informationsbedingte Verschwendung in Bezug auf Informationsfluss und Informationslogistik beschreiben. Hierbei erfolgt durch das Übernehmen oder die Adaption der klassischen sieben Verschwendungsarten oftmals der Transfer auf das informationsbezogene Pendant. Vereinzelt gehen über diesen Transfer hinaus und führen Erweiterungen auf. Die betrachteten Ansätze und ihr Bezug zu den aus der Literatur hergeleiteten informationsbedingten Verschwendungsarten *Warten, Transport, Bewegung, Überbearbeitung, Bestände, Fehler, Redundanz, Schnittstellen, Desorganisation* und *ungenutztes Potenzial* werden in Tabelle 5.1 aufgeführt.



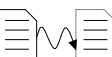




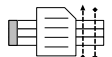
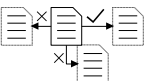

Tabelle 5.1: Herleitung informationsbedingter Verschwendungsarten

Legende:	Informationsbedingte Verschwendungsarten									
	Warten	Transport	Bewegung	Überbearbeitung	Bestände	Fehler	Redundanz	Schnittstellen	Desorganisation	Ungenutztes Potenzial
● umfassend abgebildet										
◐ größtenteils abgebildet										
◑ teilweise abgebildet										
○ nicht abgebildet										
□ Erweiterung										
ALTENDORFER-KAISER ET AL. 2015	●	◑	●	◑	◑	●	◑	●	◑	◑
ARROMBA ET AL. 2019	◑	◑	●	●	●	●	◑	○	◑	○
DITTRICH 2008	●	●	●	◑	●	●	◑	●	◑	○
GESSERT ET AL. 2019	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	○	◑
HICKS 2007	◑	◑	◑	◑	●	◑	◑	●	◑	○
MAGENHEIMER 2014	●	◑	●	◑	●	●	◑	●	◑	◑
MARTTONEN-AROLA & BAGLEE 2019	●	●	●	●	◑	●	●	◑	◑	◑
MEUDT ET AL. 2017B	●	●	●	◑	●	◑	◑	◑	○	◑
NOESKE 1999	◑	◑	○	○	◑	◑	◑	◑	◑	◑
RISCH ET AL. 2011	◑	◑	◑	●	◑	●	●	●	○	◑
ROH 2019	◑	◑	●	●	●	●	●	◑	◑	◑
UCKELMANN 2014	●	●	●	●	●	◑	◑	●	◑	○
VERHAGEN ET AL. 2015	●	●	●	●	●	●	●	◑	○	◑

Ergänzend bilden die Desorganisation sowie die ungenutzten Potenziale, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt werden, eine wesentliche Erweiterung, da diese in bestehenden Ansätzen in der Regel nicht explizit betrachtet oder beschrieben werden. Nachstehend sind die hergeleiteten informationsbedingten Verschwendungsarten, die basierend auf Recherche, der beschriebenen Reduktion und Konsolidierung hergeleitet wurden, in Tabelle 5.2 dargestellt. Die Darstellung führt Symbole zu den informationsbedingten Verschwendungsarten ein und erläutert die informationsbedingten Verschwendungsarten jeweils kurz allgemein und mit Beispielen.

Diese informationsbedingten Verschwendungsarten stellen eine allgemeine Beschreibung dar, um in Wertströmen auftretende informationsbedingte Verschwendungen einordnen zu können. Die Vermeidung informationsbedingter Verschwendungen unterstützt bei der Realisierung der Zielsetzungen von Informationsfluss und Informationslogistik. Hierbei kann das Reduzieren und Eliminieren von Zeit- und Qualitätsverlusten in Wertströmen, die auf informationsbedingte Verschwendungen zurückzuführen sind, zu einer verbesserten Erreichung der Zielsetzungen von Informationsfluss und Informationslogistik beitragen. Um derartige Verschwendungen zu vermeiden, sollen die in Abschnitt 5.3.4 hergeleiteten und beschriebenen informationsbezogenen Gestaltungsansätze herangezogen werden können.

Tabelle 5.2: Informationsbedingte Verschwendungsarten

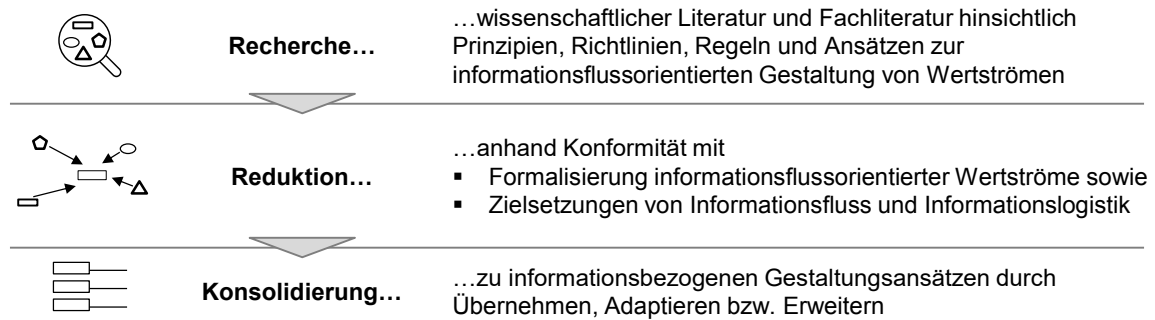
	Symbol	Beschreibung und <i>Beispiel</i>
<b>Warten</b>		Informationsbedingtes Warten von Informationsflussteilnehmern z. B. <i>Bearbeitungsinformationen erst nach oder bereits vor Produktionsprozessbeginn vorhanden</i>
<b>Transport</b>		Transport von Informationen zwischen Informationsflussteilnehmern (Änderung der Information bzgl. Ort oder Zeit) z. B. <i>Übermitteln von papierbasierten Dokumenten für Nachbestellung vormontierter Produkte über Kanban-Karte</i>
<b>Bewegung</b>		Bewegungen für das Suchen, Sammeln oder Zusammenführen von Informationen; Verarbeitung in eine benötigte Form z. B. <i>Suchen nach den benötigten Informationen für die Anzahl zu montierender Produkte in Anweisungskatalog; Übertragen papiergebundener Information in digitales System</i>
<b>Überbearbeitung</b>		Verarbeitung von Informationen in einen unbenötigten Zustand; nicht erforderliche/r Detailgrad und Genauigkeit von Informationen z. B. <i>Erstellen von Messwerten zur Dokumentation von Qualitätsmerkmalen um Zehnerpotenz genauer als benötigt</i>
<b>Bestände</b>		Zusätzliche und nicht benötigte Informationen ohne Nutzungsabsicht; veraltete Informationen z. B. <i>Dokumentation zusätzlicher Informationen zur Auftragsabwicklung, die keine weitere Verwendung finden</i>
<b>Fehler</b>		Erzeugen oder Verwenden defizitärer Information von Informationsflussteilnehmern; Korrekturarbeiten aufgrund defizitärer Informationen z. B. <i>Anzeigen falscher Auftragsunterlagen durch Monitor an Arbeitsstation</i>
<b>Redundanz</b>		Informationen zum gleichen Sachverhalt in mehrfacher Ausführung und ohne gegebenen Bedarf z. B. <i>Auftragsinformationen sowohl in Papierform als auch in Datenbank vorhanden</i>
<b>Schnittstellen</b>		Wechsel von Informationen zwischen mehreren Informationsflussteilnehmern z. B. <i>mehrfacher Wechsel des Zustands von Informationen von digital auf analog und von analog zurück auf digital</i>
<b>Desorganisation</b>		Defizite in der Gestaltung (Planung, Steuerung, Überwachung) von Prozessen des Informationsflusses und der Informationslogistik z. B. <i>falsche Information zu falscher Zeit, in falscher Qualität, in falscher Menge, in falscher Form, am falschen Ort; Workarounds</i>
<b>Ungenutztes Potenzial</b>		Ungenutzte oder noch nicht vorhandene Informationen, deren Einsatz und Nutzung zur Realisierung von Produktivitätspotenzialen führt z. B. <i>Ortungsdaten eines RFID-Systems zur Ermittlung von Bewegungen, jedoch nicht zur Ermittlung von Liegezeiten genutzt; Realisierung von Potenzialen durch weitere bisher nicht verwendete digitale Technologie(n)</i>

### 5.3.4 Herleitung informationsbezogener Gestaltungsansätze

Der Begriff Gestaltungsansatz setzt sich aus den Wörtern Gestaltung und Ansatz zusammen. Gängige Synonyme zu Gestalten sind Formen, Aufbauen, Anordnen oder



mationsfluss und Informationslogistik (Abschnitt 5.3.2) konforme Reduktion. Abschließend werden diese Inhalte zu informationsbezogenen Gestaltungsansätzen konsolidiert (vgl. Abbildung 5.16).



*Abbildung 5.16: Ablauf zur Herleitung informationsbezogener Gestaltungsansätze*

Nachfolgend werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten informationsbezogenen Gestaltungsansätze *Prozess(re)strukturierung*, *Durchgängigkeit*, *synchronisierte Kollaboration*, *Funktionsfähigkeit*, *Performanz*, *schlankes Informationssystem* sowie *Ideenmanagement* beschrieben und anhand beispielhafter Maßnahmen veranschaulicht. Eine Maßnahme ist hierbei eine „Handlung (...), die etwas Bestimmtes bewirken soll“ (DUDEN 2017). In diesem Zusammenhang bilden Maßnahmen Handlungen ab, die zur Realisierung der informationsbezogenen Gestaltungsansätze dienen. Die aufgeführten Beispiele der Maßnahmen nehmen jeweils Bezug zu digitalen Technologien, ohne dass dies eine bindende Einschränkung ableitbarer Maßnahmen darstellen soll.

### **Prozess(re)strukturierung**

Dieser Gestaltungsansatz adressiert Möglichkeiten struktureller Anpassungen von Prozessen des Informationsflusses und von der Informationslogistik. Diese Anpassungen von Prozessen und Prozessketten können durch Weglassen, Hinzufügen, Auslagern, Zusammenfassen, Parallelisieren, Verzweigen, Wiederholen oder Verlagern realisiert werden (BLEICHER 1991, KRCMAR 2015B). Implizit adressiert dieser Gestaltungsansatz darüber hinaus die Erweiterbarkeit und Modularität der jeweiligen Prozesse und Informationssystembestandteile.

Eine beispielhafte Maßnahme ist das Auslagern zweier sequenziell angeordneter optischer Prüfprozesse. Diese können zukünftig parallel von zwei Prüfvorrichtungen einer digitalen Technologie durchgeführt werden, wodurch eine zeitgleiche Prozessausführung ermöglicht wird.

### **Durchgängigkeit**

Ziel dieses Gestaltungsansatzes ist es, eine Durchgängigkeit abgebildeter Strukturen entlang der Prozesse des Informationsflusses und innerhalb eines Informationssystems zu schaffen. Die Etablierung von Standards soll hierbei eine übergreifende Kommunikation, Kopplung, Vernetzung und Zusammenarbeit zwischen Informationsflussteilnehmern unterstützen, ohne jedoch starre Strukturen zu festigen. Eine einheitliche Konsistenz der verwendeten Infrastruktur des Informationssystems ermöglicht Transparenz entlang der Prozesskette des Informationsflusses.

Zugehörige Maßnahmen können beispielsweise das Standardisieren und Vereinheitlichen von Daten- und Informationsträgern, Datenformaten oder eingesetzten digitalen Technologien sein, um eine vereinfachte Konnektivität entlang der Prozesskette des Informationsflusses zu ermöglichen.

### **Synchronisierte Kollaboration**

Dieser Gestaltungsansatz adressiert eine synchronisierte Zusammenarbeit zwischen den Prozessen des Informationsflusses selbst sowie zwischen den Prozessen des Informationsflusses und des Materialflusses, die zeitlich ideal aufeinander abzustimmen sind. Durch eine anforderungs- und bedarfsgerechte Informationslogistik sind die Prozesse des Materialflusses durch Prozesse des Informationsflusses bestmöglich zu unterstützen.

Eine Maßnahme ist beispielsweise die zeitgerechte Bereitstellung von benötigten Informationen für Informationsflussteilnehmer, die wertschöpfende Prozesse verrichten, durch installierte Monitore. Dadurch sollen diese Informationsflussteilnehmer uneingeschränkt der Ausübung wertschöpfender Prozesse nachgehen können und nicht mit dem Suchen auftragsbezogener Informationen beschäftigt sein.

### **Funktionsfähigkeit**

Erfolgsfaktor für die Funktionsfähigkeit eines Informationssystems und folglich von Prozessen des Informationsflusses sowie von der Informationslogistik ist eine hohe Qualität von Informationen. Diese Informationsqualität kann anhand von 15 Dimensionen aus vier Kategorien sichergestellt werden. Nachfolgend werden die vier Kategorien und ihre zugehörigen Dimensionen der Informationsqualität<sup>9</sup> aufgeführt (WANG & STRONG 1996, KRCCMAR 2015B, ROHWEDER ET AL. 2018):

- Inhärent: Verlässlichkeit, Fehlerfreiheit, Objektivität, Glaubwürdigkeit

---

<sup>9</sup> Für eine detaillierte Beschreibung der Dimensionen der Informationsqualität sei auf die angegebene Literatur verwiesen (WANG & STRONG 1996, KRCCMAR 2015B, ROHWEDER ET AL. 2018).



- Darstellungsbezogen: Eindeutige Auslegbarkeit, einheitliche Darstellung, Übersichtlichkeit, Verständlichkeit
- Zweckabhängig: Relevanz, angemessener Umfang, Vollständigkeit, Wertschöpfung, Aktualität
- Zugangsbezogen: Zugänglichkeit, Bearbeitbarkeit

Maßnahmen können sich beispielsweise in einer anforderungsgerechten und nutzerzentrierten Mensch-Maschine-Schnittstelle über eine Augmented-Reality-Lösung widerspiegeln. Hierdurch sollen präventiv Fehler beim Übertragen von Informationen an der Schnittstelle zwischen den Informationsflussteilnehmern unterbunden werden.

### **Performanz**

Prozesse des Informationsflusses sollen nicht der limitierende Faktor für die Leistungsfähigkeit von Materialflüssen und ihren Produktionsprozessketten sein. Ziel dieses Gestaltungsansatzes ist es, eine höhere Leistungsfähigkeit von Prozessen des Informationsflusses zu ermöglichen. Beispielsweise können Informationsflussteilnehmer eines Informationssystems durch performantere Informationsflussteilnehmer substituiert werden. Auch kann die Berücksichtigung ergonomischer Aspekte der Informationsbereitstellung oder Informationsaufnahme eine Beschleunigung informationsbezogener Prozesse, bei denen Mitarbeiter eingebunden sind, bewirken.

Eine Maßnahme kann die Automatisierung von Abläufen sein, indem beispielsweise digitale Technologien eingesetzt werden, um durch eine Beschleunigung der Abläufe die erforderlichen Zeiten dieser Abläufe zu reduzieren.

### **Schlankes Informationssystem**

Bei einem schlanken Informationssystem steht die Zielsetzung im Vordergrund, die im Informationssystem enthaltene Infrastruktur zur Handhabung von Informationen auf das erforderliche Mindestmaß zu reduzieren. In diesem Zusammenhang ist auf eine bedarfsorientierte, effektive und möglichst medienbruchfreie Gestaltung des Informationssystems und der Informationsflüsse zu achten, indem nur tatsächliche Informationsbedarfe von Informationsflussteilnehmern mit dem benötigten Informationsangebot bedient werden. Die Betrachtung dieses Gestaltungsansatzes erstreckt sich auf alle drei Ebenen der eingeführten Klassifizierung der Informationsflussteilnehmer aus Abschnitt 5.2.2. Dieser Gestaltungsansatz kann in Konflikt zu anderen Gestaltungsansätzen stehen, weshalb abgeleitete Maßnahmen aufeinander abzustimmen sind.

Eine mögliche Maßnahme kann darin bestehen, mehrere Daten- und Informationsträger in einem digitalen Informationsflussteilnehmer zusammenzuführen oder durch andere Medien zu substituieren. Dadurch kann beispielsweise die Anzahl von Informationsflussteilnehmern sowie die Anzahl von Medienbrüchen und Schnittstellen reduziert werden.

### **Ideenmanagement**

Dieser Gestaltungsansatz adressiert das Einbinden von Mitarbeitern in geleiteten Kreativitätsprozessen, damit ihr Wissens- und Erfahrungsschatz bei der Identifikation von Verbesserungsmöglichkeiten eingebracht werden kann. Dieser Gestaltungsansatz hat folglich eine Querschnittsfunktion, da er bei der Entwicklung und dem Ableiten von Maßnahmen bezüglich der anderen Gestaltungsansätze unterstützt.

Beispielsweise können in einem etablierten kontinuierlichen Verbesserungsprozess Mitarbeiter bei der Ideenfindung, welche digitale Technologien in welcher Art und Weise bei der Prozessdurchführung unterstützen können, eingebunden werden. Dadurch lassen sich die Erfahrungen und das Wissen der Mitarbeiter bei der Maßnahmenidentifikation und -ableitung zielführend einbringen. Aufgrund der Einbindung und Partizipation der Mitarbeiter wird bei den durch diesen Gestaltungsansatz ermittelten Maßnahmen insbesondere die Mitarbeiterakzeptanz gefördert.

Die Gestaltungsansätze sind allgemein beschrieben und haben keinen bindenden Charakter. Durch ihre Anwendung und die darauf aufbauende Ableitung spezifischer Maßnahmen sollen Verbesserungen hinsichtlich des Informationsflusses und der Informationslogistik erreicht werden. Dadurch lassen sich Verbesserungen des Materialflusses erzielen. Die informationsbezogenen Gestaltungsansätze können in Kombination verwendet werden und sich gegebenenfalls auch gegenseitig beeinflussen. Die betrachtete Literatur, die für die Entwicklung und Herleitung der informationsbezogenen Gestaltungsansätze herangezogen wurde, ist in Tabelle 5.3 aufgeführt. Die hier eingeführten Symbole sollen im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit die jeweiligen informationsbezogenen Gestaltungsansätze repräsentieren.

In Abgleich mit der betrachteten Literatur wird ersichtlich, dass vorhandene Gestaltungsansätze in anderen Problemkontexten als dem der vorliegenden Arbeit skizziert und beschrieben sind. Darüber hinaus existiert keine konsolidierte Aufstellung im Kontext der informationsbezogenen Gestaltung von Wertströmen. Der wissenschaftliche Mehrwert bezüglich der entwickelten informationsbezogenen Gestaltungsansätze als Erweiterung zum Stand des Wissens besteht folglich in der Übertragung auf

den Problemkontext der vorliegenden Arbeit sowie dem Adaptieren, Erweitern, Beschreiben und Konsolidieren zu einer gesamtheitlichen Aufstellung, die für die informationsflussorientierte Gestaltung von Wertströmen verwendet werden kann.

Tabelle 5.3: Herleitung informationsbezogener Gestaltungsansätze

Informationsbezogene Gestaltungsansätze							
Legende:	Prozess(re)- strukturierung	Durchgängigkeit	Synchronisierte Kollaboration	Funktionsfähigkeit	Performanz	Schlankes Informationssystem	Ideenmanagement
● umfassend abgebildet							
◐ größtenteils abgebildet							
◑ teilweise abgebildet							
○ nicht abgebildet							
Symbol							
BAUERNHANSL ET AL. 2018	◑	◐	◐	◐	●	◐	○
BLEICHER 1991	●	○	○	○	◐	○	◐
DOMBROWSKI ET AL. 2018B	◐	◐	◐	●	◐	◐	○
FLEISCHMANN ET AL. 2018	◐	◐	●	◐	◐	○	◐
GESSERT ET AL. 2019	◐	◐	◐	○	◐	◐	◐
HARTLEIF ET AL. 2017	◐	◐	◐	●	◐	◐	○
HARTMANN ET AL. 2018A	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐
HICKS 2007	◐	◐	◐	◐	○	●	◐
HOFFMANN & HEIMES 2018	◐	●	◐	●	◐	◐	○
JODLBAUER 2018	◐	◐	◐	◐	●	○	○
KRCMAR 2015B	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐
LEE 2014	◐	◐	◐	◐	◐	○	○
LEWIN ET AL. 2019	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐
MERHAR ET AL. 2019	◐	○	○	○	◐	◐	●
METTERNICH ET AL. 2017	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐
MOLEND A ET AL. 2019	◐	●	○	○	◐	◐	○
O'SHEA 2016	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○
RISCH ET AL. 2011	◐	◐	◐	●	◐	◐	◐
ROH 2019	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○
ROHWEDER ET AL. 2018	◐	○	○	◐	○	○	◐
ROY 2017	◐	◐	●	◐	◐	○	◐
SCHAEDE ET AL. 2018	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○
UCKELMANN 2014	◐	◐	◐	◐	◐	○	○

### **5.4 Modellierung von Wirkzusammenhängen in Wertströmen**

#### **5.4.1 Allgemeines**

Für die Untersuchung von Wirkzusammenhängen in Wertströmen, die aus der Integration digitaler Technologien resultieren, erfolgt zunächst eine systemtheoretische Einordnung Ganzheitlicher Produktionssysteme in Abschnitt 5.4.2. Darauf aufbauend werden die Auswahl eines geeigneten Modellierungsansatzes sowie die Modellbildung durchgeführt. Abschnitt 5.4.3 führt die Verwendung des System-Dynamics-Ansatzes auf, dessen Modellbildung zum vorliegenden Problemkontext in den Abschnitten 5.4.4 bis 5.4.7 beschrieben wird.

#### **5.4.2 Systemtheoretische Einordnung**

Systeme beschreiben eine Menge von in Beziehung stehenden und sich gegenseitig beeinflussenden Elementen (WIENDAHL 2011, DIN IEC 60050-351, DIN EN ISO 9000), die Eigenschaften besitzen, definierte Ziele verfolgen und über Material- und Informationsflüsse miteinander verbunden sind (PATZAK 1982). Geschlossene Systeme haben keinen Austausch von Material- oder Informationsfluss zu ihrer Umwelt und können in einen zeitunabhängigen Zustand übergehen. Offene Systeme hingegen erreichen aufgrund ihrer Interaktion über ihre Systemgrenzen hinweg keinen zeitunabhängigen Zustand und gelten daher als dynamisch (PATZAK 1982, KOŠTURIK & GREGOR 1995). Lässt sich zudem das Verhalten der Systemelemente nicht exakt vorhersagen, so liegt aufgrund zufallsbedingter Veränderungen ein stochastisches System vor (KOŠTURIK & GREGOR 1995).

Die Systemelemente von Produktionssystemen haben die Aufgabe, Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen durch mindestens einen Produktionsprozess zu überführen (FRISCHKE 2006). Produktionssysteme stehen daher über ihre Systemgrenzen hinaus in Interaktion mit ihrer Umwelt, da Eingangsgrößen wie Material und Auftragsinformationen über Produktionsprozesse und Produktionsprozessketten zu Ausgangsgrößen in Form von Produkten verarbeitet werden. Zudem sind die Produktionsabläufe und Materialflüsse von Produktionssystemen Unsicherheiten aufgrund externer und interner Faktoren ausgesetzt (KOŠTURIK & GREGOR 1995, PETER 2009, UNTERBERGER 2020). Zu Unsicherheiten durch externe Faktoren zählen beispielsweise terminliche Schwankungen bei der Wiederbeschaffung von Vorprodukten von Lieferanten oder volatile marktseitige Nachfrageschwankungen von Produkten

(SCHUH ET AL. 2014A). Demgegenüber sind Unsicherheiten, die durch interne Faktoren bedingt sind, beispielsweise Störungen durch Maschinen-, Werkzeug- oder Personalausfälle (SCHUH ET AL. 2014B). Unsicherheiten können aber auch vom Produktionsfaktor Information ausgehen, da informationsbedingte Verschwendungen in Form von Zeit- oder Qualitätsverlusten mit gewissen Wahrscheinlichkeiten auftreten. Darüber hinaus nimmt die Komplexität von Produktionssystemen mit einer steigenden Anzahl zu betrachtender Systemelemente in Form von in Beziehung stehenden Produktionsprozessen zu (MÖNCH 2006).

Aufgrund der aufgeführten Merkmale lassen sich Produktionssysteme als offene, dynamische, stochastische und komplexe Systeme beschreiben (KOŠTURIK & GREGOR 1995, MÖNCH 2006). Folglich können die Zusammenhänge hinsichtlich der Systemtheorie auf Ganzheitliche Produktionssysteme übertragen werden.

### 5.4.3 System Dynamics zur Modellierung von Wertströmen

Simulation beschreibt „Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 3633). Ein Modell beschreibt ein „(...) verkürztes Abbild eines natürlichen oder künstlichen Originals, welches für ein bestimmtes Subjekt innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens einen bestimmten Zweck erfüllt“ (KRCMAR 2015B nach STACHOWIAK 1973). Simulationsmodelle, welche die zu untersuchenden Systeme und ihre Teilsysteme in abstrahierter Form abbilden, werden verwendet, um das zeitliche Ablaufverhalten in empirischen Untersuchungen aufzuzeigen (SCHMIDT 2009, VDI 3633). Simulation ermöglicht auch die Untersuchung von Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme anhand eines Modells, ohne in diese Systeme physisch einzugreifen und ohne dass zu evaluierende oder geplante Veränderungen realisiert sein müssen (ROESSLER ET AL. 2014, OMOGBAI & SALONITIS 2016, ANTONELLI ET AL. 2018). Für die Simulation von Produktionssystemen einschließlich ihrer Teilsysteme auf Materialflussebene existieren verschiedene Simulationsansätze aus den Bereichen ereignisdiskreter Simulation, agentenbasierter Simulation oder Simulation nach dem System-Dynamics-Ansatz (ROESSLER ET AL. 2015).

System Dynamics wurde ursprünglich für die Analyse der zeitveränderlichen Prozesse von Industrieunternehmen entworfen (FORRESTER 1969, STERMAN 2000). Ziel von Untersuchungen durch System Dynamics ist das Gewinnen von Erkenntnissen zum Verhalten komplexer Systeme bei Veränderung ihrer Parameter, indem deren

Auswirkungen durch Simulationsexperimente ermittelt werden (NAGEL 2003, WENZEL ET AL. 2008, PETER 2009). System Dynamics dient in diesem Zusammenhang der integrativen und systemorientierten Darstellung der Struktur und des Verhaltens soziotechnischer Systeme, indem die wesentlichen Zusammenhänge auf Basis von graphisch und mathematisch abstrahierten Regelkreisstrukturen simuliert werden (PATZAK 1982, GRÖBLER 2008). Dadurch lassen sich die Ursache-Wirkungs-Beziehungen und Wirkzusammenhänge betrachteter Parameter eines mit System Dynamics modellierten Systems abbilden und die Auswirkungen von Veränderungen dieser Parameter identifizieren (BRADL 2004, TEFAMARIAM & LINDBERG 2005, ANTONELLI ET AL. 2018). Um auch das dynamische, stochastische und komplexe Verhalten von Produktionssystemen abzubilden, zu modellieren und zu simulieren, hat sich System Dynamics zu einem weit verbreiteten Ansatz entwickelt (TEFAMARIAM & LINDBERG 2005, GRÖBLER 2008), dessen Eignung im Kontext Ganzheitlicher Produktionssysteme (z. B. PETER 2009, AULL 2013, SCHNELLBACH 2016, DOMBROWSKI ET AL. 2016, DREWS ET AL. 2016) und der Wertstrommethode (z. B. SCHNELLBACH 2016, STADNICKA & LITWIN 2017, STADNICKA & LITWIN 2019) bereits mehrfach bestätigt wurde. Folglich können die Wertströme und die zugehörigen Produktionsprozessketten Ganzheitlicher Produktionssysteme mittels System Dynamics untersucht werden. In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Erweiterung einer Betrachtung durch System Dynamics in Bezug auf die Modellierung von Auswirkungen durch veränderte Informationsflüsse in zu untersuchenden Wertströmen, wodurch die Auswirkungen der Integration digitaler Technologien identifiziert werden sollen.

System-Dynamics-Projekte setzen sich aus den beiden Phasen der Modellbildung und Modellanwendung zusammen (vgl. Tabelle 5.4). Diese Phasen sowie die zugehörigen Schritte orientieren sich an der in der Fachliteratur beschriebenen Vorgehensweise zur Umsetzung des System-Dynamics-Ansatzes. Nachstehend werden die Schritte der Modellbildung beschrieben.

*Tabelle 5.4: Phasen und Schritte des System-Dynamics-Ansatzes (in Anlehnung an COYLE 1996, STERMAN 2000, GRÖBLER 2008)*

Phase	Schritt	Beschreibung	Abschnitt
<b>Modellbildung</b>	1	Charakterisierung des Untersuchungsgegenstands	5.4.4
	2	Abbildung der qualitativen Modellstruktur	5.4.5
	3	Entwicklung des System-Dynamics-Modells	5.4.6
	4	Verifikation und Validierung der Modellbildung	5.4.7
<b>Modellanwendung</b>	5	Simulationsparametrierung und -durchführung	6.4.2 und 6.4.4

### 5.4.4 Charakterisierung des Untersuchungsgegenstands

Gemäß dem Handlungsbedarf bezüglich der Modellierung von Wirkzusammenhängen in einzelnen Produktionsprozessen sowie in Produktionsprozessketten von informationsflussorientierten Wertströmen erfolgt zunächst die Charakterisierung. Hierbei wird die Zielsetzung beschrieben sowie der Untersuchungsgegenstand charakterisiert, wofür das System-Dynamics-Modell erstellt werden soll. Eine Fokussierung auf wesentliche Systemelemente sowie die Definition der Systemgrenzen des Untersuchungsgegenstands sind entscheidende Erfolgsfaktoren in diesem Schritt der Modellbildung.

Sowohl das aktuelle Verhalten als auch das zukünftige Verhalten, wenn informationsbezogene Parameter der Wertströme eines Ganzheitlichen Produktionssystems verändert werden, sollen mit System Dynamics untersucht und prognostiziert werden können. Ausgehend von lokalen Parameterveränderungen in den Wertströmen, die durch eine veränderte Integration von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien verursacht werden, sollen die Auswirkungen auf die Zielgrößen eines Ganzheitlichen Produktionssystems (vgl. Abschnitt 2.2.3) ermittelt werden können. Hierbei sollen auch die von lokalen Veränderungen ausgehenden Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Produktionsprozesse bzw. Puffer abgebildet werden können.

Die in diesem Rahmen zu untersuchenden Produktionsprozesse weisen stochastisches und dynamisches Verhalten auf. Durch die Kopplung von Produktionsprozessen und Puffern zu einer Produktionsprozesskette nimmt die Komplexität des Untersuchungsgegenstands aufgrund zusätzlich entstehender Wirkzusammenhänge zu. Der Untersuchungsgegenstand der Simulationsexperimente bezieht sich hierbei auf eine ausgewählte Produktionsprozesskette, deren erster Schritt und deren letzter Schritt die Systemgrenzen hinsichtlich des betrachteten Wertstroms bilden. Das Simulationsmodell soll deshalb den Zustand einer ausgewählten Produktionsprozesskette mit den spezifischen Parametern inhärenter Produktionsprozesse und Puffer sowie vorliegende Wirkzusammenhänge abbilden können. Dadurch sollen die von veränderten Informationsflüssen ausgehenden Auswirkungen auf die Zielgrößen der Produktionsprozesskette aufgezeigt werden.

Die zugrunde liegenden Parameter der zu untersuchenden Produktionsprozesskette für die Simulationsexperimente werden durch die informationsflussorientierte Wertstromanalyse ermittelt (vgl. Abschnitt 6.2). Ein Simulationsmodell, das mit dem aus einem realen Produktionssystem ermittelten Wertstrom parametrisiert werden soll, bildet das Referenzmodell, wenn die Abweichungen der realen und simulativ ermittelten

Werte zu den Zielgrößen innerhalb einer definierten Toleranz liegen. Ausgehend von dem Referenzmodell sollen die Auswirkungen von Integrationsszenarien, die eine veränderte Integration von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien abbilden, prognostiziert werden können. Ein Szenario beschreibt allgemein eine „hypothetische Aufeinanderfolge von Ereignissen, die zur Beachtung kausaler Zusammenhänge konstruiert wird“ (DUDEN 2017). Entsprechend ist ein Integrationsszenario eine Aufeinanderfolge von Veränderungen durch Integrationsneuerungen<sup>10</sup> bzw. Integrationsanpassungen<sup>11</sup> von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien in einem Wertstrom. Etwaige kausale Wirkzusammenhänge, die von Integrationsneuerungen bzw. Integrationsanpassungen ausgehen, können neutral, verstärkend oder abschwächend sein. Die Abweichungen zu den simulativ ermittelten Werten der Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme zwischen Referenzmodell und dem jeweiligen Integrationsszenario zeigen entsprechend auf, wie sich Integrationsszenarien unter Berücksichtigung von stochastischem Verhalten und von dynamischen Wirkzusammenhängen auf Produktionsprozessketten eines Ganzheitlichen Produktionssystems auswirken können.

Mittels der Untersuchungen durch System Dynamics sollen sich somit alternative Integrationsszenarien bewerten lassen, indem die Werte der Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme zu diesen Integrationsszenarien simulativ ermittelt bzw. prognostiziert werden. Durch diese quantitativen Prognosen können Entscheidungen hinsichtlich der Umsetzung von Integrationsszenarien unterstützt werden, ohne jedoch physisch in die betrachtete Produktionsprozesskette eingreifen zu müssen.

### 5.4.5 Abbildung der qualitativen Modellstruktur

In diesem zweiten Schritt zur Erstellung eines System-Dynamics-Modells wird die Systemstruktur definiert, indem grundlegende Wirkzusammenhänge der Elemente des Untersuchungsgegenstands mit Kausaldiagrammen auf qualitativer Ebene formalisiert werden (COYLE 1996, AULL 2013). Kausaldiagramme basieren auf dem Regelkreisprinzip (FORRESTER 1969). Die Kausalitäten zwischen den Elementen werden in den Kausaldiagrammen über Rückkopplungsschleifen beschrieben, wobei verstärkende sowie abschwächende Wirkungen in der Modellierung zu berücksichtigen sind. Die aufeinander einwirkenden Elemente werden hierbei mit Pfeilen verbunden und eine sich in der Wirkung verstärkende Rückkopplungsschleife wird mit einem

---

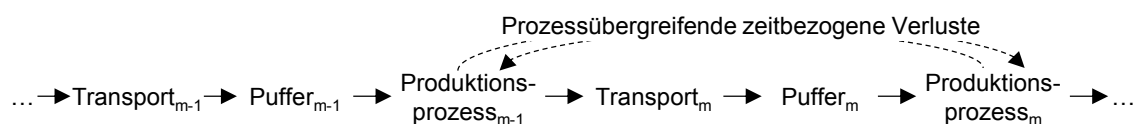
<sup>10</sup> Bei einer Integrationsneuerung werden bisher nicht im Informationssystem enthaltene Informationsflussteilnehmer zusätzlich eingebunden, wobei Abläufe des Wertstroms beeinflusst werden können.

<sup>11</sup> Bei einer Integrationsanpassung wird die Einbindung von bestehenden Informationsflussteilnehmern eines Informationssystems verändert, wobei Abläufe des Wertstroms beeinflusst werden können.



„R“ für „Reinforcement Loop“ und eine sich in ihrer Wirkung abschwächende Rückkopplungsschleife mit einem „B“ für Balancing Loop kenntlich gemacht. Bei einer sich verstärkenden Rückkopplung führt eine Erhöhung des Werts des ursprünglichen Elementes zu einer Erhöhung des adressierten Werts. Bei einer abschwächenden Wirkung gilt der entgegengesetzte Zusammenhang. Die Rückkopplungsschleifen werden in iterativen Zyklen durchlaufen, bis ein stabiler Gleichgewichtszustand erreicht ist (STERMAN 2000), wobei Dynamik und Nichtlinearität komplexer Systeme Berücksichtigung finden können (NAGEL 2003).

Bevor die Abhängigkeiten zu einem Produktionsprozess und einem Puffer in einem Kausaldiagramm aufgezeigt werden, wird zunächst die Verkettung von Produktionsprozessen und Puffern innerhalb einer Produktionsprozesskette eines informationsflussorientierten Wertstroms auf übergeordneter Ebene skizziert (vgl. Abbildung 5.17). Anschließend werden die Kausalitäten eines einzelnen Produktionsprozesses und Puffers in einem Kausaldiagramm dargelegt.



*Abbildung 5.17: Verkettung der Schritte innerhalb einer Produktionsprozesskette*

Die Produktionsprozesse und Puffer sind nach dem Prinzip einer Produktion im Fluss in Reihe geschaltet. Störungen in einem Produktionsprozess  $m$  können prozessübergreifende zeitbezogene Verluste in vor- oder nachgelagerten Produktionsprozessen bedingen. Ein mögliches Beispiel für einen Verlust im vorgelagerten Produktionsprozess  $m-1$  ist gegeben, wenn der Pufferbestand den maximalen Pufferbestand erreicht hat, weil keine Produkte in den stillstehenden Produktionsprozess  $m$  weitergegeben und keine weiteren Produkte des vorgelagerten Produktionsprozesses  $m-1$  im Puffer  $m$  zusätzlich aufgenommen werden können.

Im nächsten Schritt erfolgt die Spezifizierung der kausalen Zusammenhänge in Bezug auf einen Produktionsprozess und einen Puffer, was anhand des Kausaldiagramms in Abbildung 5.18 verdeutlicht wird. Hier repräsentieren der Pufferbestand, der Verarbeitungsbestand, die Produkte und der Ausschuss die Bestandsgrößen. Der Verarbeitungsbestand kann hierbei einfach, sequenziell oder parallel angeordnete Arbeitsstationen abbilden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Transport-, Übergangs-, Produkt- und Ausschussrate stellen hierbei Flussgrößen dar.

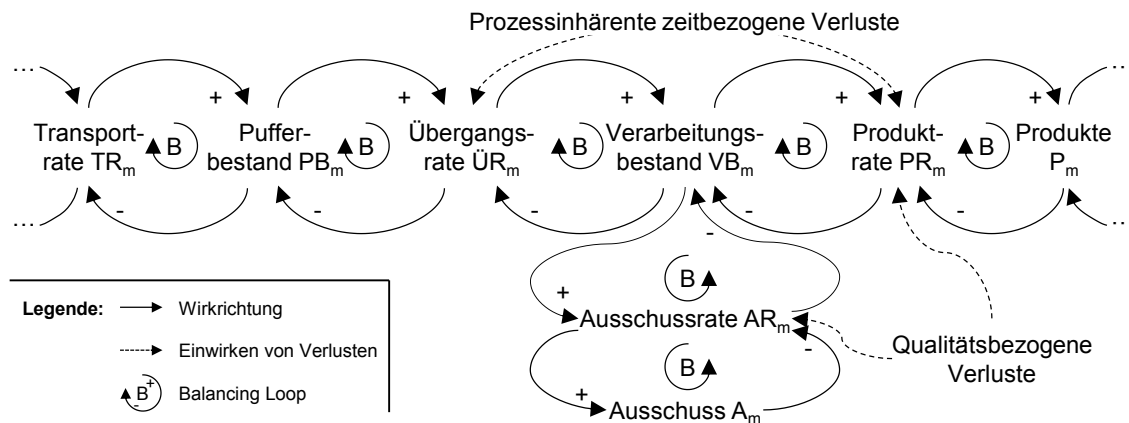


Abbildung 5.18: Kausaldiagramm eines Schritts  $m$  in einer Produktionsprozesskette

Eingangsgröße des Pufferbestands ist die Transportrate ( $TR_m$ ), mit der Produkte des vorgelagerten Produktionsprozesses in den Puffer übergeben werden. Während Puffer- und Verarbeitungsbestand direkt mit der Flussgröße der Übergangsrate ( $\dot{U}R_m$ ) verbunden sind, erfolgt nach dem Verarbeitungsbestand in Abhängigkeit qualitätsbezogener Verluste eine Verzweigung der Produkte. Diese verzweigen sich über die Flussgröße Produktrate ( $PR_m$ ) in fehlerfreie Produkte und über die Flussgröße Ausschussrate ( $AR_m$ ) in Ausschuss. Aufgrund des zeitlichen Umfangs und der Komplexität von Prozessen zur Behebung von Ausschuss bedarf es hier in der Regel gesonderter Arbeitsstationen, die nicht in einer getakteten Fließproduktion integriert sind (EVERSHEIM 1989). Da Ausschuss auch keinen Stillstand der Produktionsprozesskette bewirken soll, wird Ausschuss aus dem System ausgeschleust (GARTZEN 2012) und keinen weiteren Betrachtungen durch das System-Dynamics-Modell unterzogen. Über die Produktrate werden Produkte zur Weiterverarbeitung zum nachgelagerten Puffer und Produktionsprozess über einen definierten Transportvorgang weitergegeben.

Das entwickelte Kausaldiagramm stellt die sieben abschwächenden Rückkopplungsschleifen (Balancing Loops) in Bezug auf einen Schritt  $m$  in einer Produktionsprozesskette dar. Die Transportrate ( $TR_m$ ), über die aus dem vorgelagerten Produktionsprozess  $m-1$  Produkte ( $P_{m-1}$ ) in den Puffer  $m$  zugeführt werden, lässt den Pufferbestand anwachsen, während die Übergangsrate den Pufferbestand reduziert. Bei den Produkten ( $P_m$ ) befindet sich die Schnittstelle zum jeweils nachgelagerten Produktionsprozess, wo eine weitere Rückkopplung über die anschließende Transportrate ( $TR_{m+1}$ ) erfolgen kann. Aufgrund der Verkettung mit vor- und nachgelagerten Puffern und Produktionsprozessen können so die prozessübergreifenden Wirkzusammenhänge abgebildet werden.

Die Beschreibungen der Produktionsprozesskette und des Kausaldiagramms eines Produktionsprozesses zeigen das grundlegende Verhalten einer Produktionsprozesskette auf. Darauf aufbauend werden diese qualitativen kausalen Zusammenhänge im nächsten Schritt der Erstellung eines System-Dynamics-Modells um mathematische Zusammenhänge erweitert, damit informationsflussorientierte Wertströme quantitativ untersucht werden können.

### 5.4.6 Entwicklung des System-Dynamics-Modells

Das Kausaldiagramm, das in der qualitativen Modellstruktur entwickelt wurde, kann die sich dynamisch verändernden Flüsse und Bestände, die durch veränderte Informationsflüsse bedingt sind, nicht abbilden. Die in der qualitativen Modellstruktur erläuterten Zusammenhänge innerhalb von einzelnen Schritten einer Produktionsprozesskette und die Zusammenhänge zwischen diesen Schritten dienen jedoch als Grundlage für die Erstellung des eigentlichen System-Dynamics-Modells, die in diesem Abschnitt beschrieben wird. Die Entwicklung quantitativer Zusammenhänge, aufbauend auf den vorstehend geschilderten qualitativen Zusammenhängen, erfolgt auf Basis der mathematischen Grundlagen zur System-Dynamics-Modellierung. Die Entwicklung des System Dynamics-Modells wird im Folgenden anhand von allgemeinen Bestimmungen, Bestandsgrößen, Flussgrößen, Zusatzvariablen und spezifischen Bestimmungen beschrieben.

#### Allgemeine Bestimmungen

Für die Erstellung von Modellen nach dem System-Dynamics-Ansatz existieren Softwarelösungen unterschiedlicher Anbieter. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgte die Erstellung des System-Dynamics-Modells durch die Softwarelösung von AnyLogic. Hierfür wurde die kostenfreie „Personal Learning Edition PLE“ verwendet (THE ANYLOGIC COMPANY 2019).

Die generische Modellierung der Produktionsprozesskette informationsflussorientierter Wertströme durch das System-Dynamics-Modell kann neben der Abbildung von Fertigungs- und Montageprozessen ebenso für die Abbildung von Transport- und Puffervorgängen Verwendung finden. Der zeitliche Simulationsumfang des Modells wird auf die tägliche Produktionslaufzeit festgelegt und ist auf einen Mehrschichtbetrieb erweiterbar, damit das Modell entsprechend mit der Wertstrommethode assimiliert werden kann. Die Parametrierung der Simulationsstudien und die zeitliche Diskretisierung der Modellierung erfolgen auf Basis von Sekunden. Bei Bedarf kann die Parametrierung mit einem anderen Detailgrad der Diskretisierung abgebildet werden.

Abbildung 5.19 zeigt das entwickelte Flussdiagramm des System-Dynamics-Modells, in dem die beschriebenen Bestandsgrößen mit den zugehörigen Flussgrößen verbunden sind. Hierbei sind die Bestandsgrößen jeweils zentral angeordnet, wobei ihr Bestand während eines Simulationslaufs vom initialen Bestand, von der Zu- und Abflussrate sowie von auftretenden Verlusten über den Zeitverlauf abhängt.

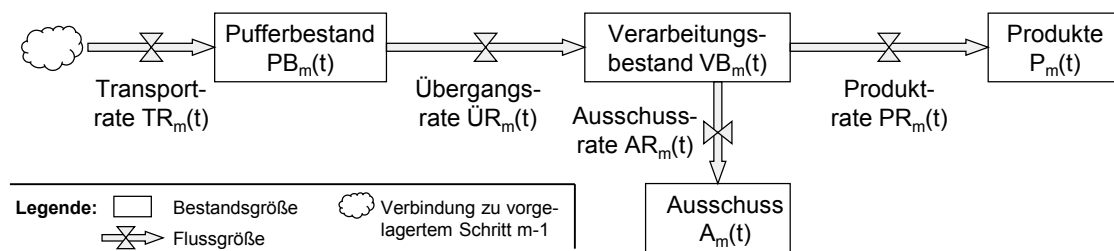


Abbildung 5.19: Flussdiagramm des System-Dynamics-Modells von einem Schritt  $m$  einer Produktionsprozesskette

Zwischen den Bestandsgrößen kann der Materialfluss durch die Flussgrößen abgebildet werden. In dem Flussdiagramm der Abbildung 5.19 beschreiben Pufferbestand ( $PB_m(t)$ ), Verarbeitungsbestand ( $VB_m(t)$ ), Produkte ( $P_m(t)$ ) und Ausschuss ( $A_m(t)$ ) die Bestandsgrößen über den Zeitverlauf, während die Transportrate ( $TR_m(t)$ ), Übergangsrate ( $\ddot{U}R_m(t)$ ), Produktrate ( $PR_m(t)$ ) sowie Ausschussrate ( $AR_m(t)$ ) die Flussgrößen über den Zeitverlauf repräsentieren.

### Bestandsgrößen und Flussgrößen

Die Bestandsgrößen  $PB_m(t)$ ,  $VB_m(t)$ ,  $P_m(t)$  und  $A_m(t)$  werden als Integralgleichungen formuliert, um den Fluss an Beständen entsprechend den einzelnen Stufen abbilden zu können. Ausgehend von einem initialen Pufferbestand ( $PB_m(t_0)$ ) werden dem aktuellen Pufferbestand ( $PB_m(t)$ ) Produkte des vorgelagerten Produktionsprozesses über die Transportrate ( $TR_m(t)$ ) zugeführt und für die Weiterverarbeitung im Verarbeitungsbestand ( $VB_m(t)$ ) durch die Übergangsrate ( $\ddot{U}R_m(t)$ ) dem Pufferbestand entnommen. Dieser Zusammenhang ist in der Integralgleichung von Formel (5.4) beschrieben.

Mit der Übergangsrate fließen Teile für die Verarbeitung in den Verarbeitungsbestand, in dem während der Verarbeitung genau ein Produkt bzw. ein Los enthalten ist. Erfolgt in dem betrachteten Moment keine Verarbeitung, wächst der Verarbeitungsbestand nicht weiter an, was durch Formel (5.5) deutlich wird.

$$PB_m(t) = PB_m(t_0) + \int_{t_0}^t [TR_m(t) - \ddot{U}R_m(t)]dt \quad (5.4)$$

mit	t	Zeitpunkt
	t <sub>0</sub>	Zeitpunkt zu Simulationsbeginn
	m	Produktionsprozess m
	PB <sub>m</sub> (t)	Pufferbestand zum Zeitpunkt t
	TR <sub>m</sub> (t)	Transportrate zum Zeitpunkt t
	ÜR <sub>m</sub> (t)	Übergangsrate zum Zeitpunkt t

$$VB_m(t) = VB_m(t_0) + \int_{t_0}^t [\ddot{U}R_m(t) - PR_m(t) - AR_m(t)]dt \quad (5.5)$$

mit	VB <sub>m</sub> (t)	Verarbeitungsbestand zum Zeitpunkt t
	PR <sub>m</sub> (t)	Produktrate des Produktionsprozesses m zum Zeitpunkt t
	AR <sub>m</sub> (t)	Ausschussrate des Produktionsprozesses m zum Zeitpunkt t

Entsprechend den Prozessparametern im Verarbeitungsbestand fließen Produkte oder Lose über die Produktrate oder Ausschuss über die Ausschussrate ab. Die Bestandsgröße P<sub>m</sub>(t) repräsentiert die Anzahl hergestellter Produkte zu einem Zeitpunkt t. Hierbei wird nach Formel (5.6) zu einer vorhandenen Anzahl bereits hergestellter Produkte durch das Integral über die Produktrate die Anzahl von Produkten über den Zeitverlauf addiert.

$$P_m(t) = P_m(t_0) + \int_{t_0}^t PR_m(t)dt \quad (5.6)$$

mit	P <sub>m</sub> (t)	Produkte des Produktionsprozesses m zum Zeitpunkt t
-----	--------------------	---

Neben den Produkten quantifiziert die Bestandsgröße Ausschuss (A<sub>m</sub>(t)) nach einem vergleichbaren mathematischen Zusammenhang die Anzahl von als Ausschuss klassifizierten Produkten, wie in Formel (5.7) aufgezeigt wird.

$$A_m(t) = A_m(t_0) + \int_{t_0}^t AR_m(t)dt \quad (5.7)$$

mit	A <sub>m</sub> (t)	Ausschuss des Produktionsprozesses m zum Zeitpunkt t
-----	--------------------	--

Produkte fließen mit der Transportrate ( $TR_m(t)$ ) vom vorgelagerten Produktionsprozess  $m-1$  zunächst in den Pufferbestand ( $PB_m(t)$ ). Vom Pufferbestand fließen Produkte mit der Übergangsrate ( $\ddot{U}R_m(t)$ ) weiter zum Verarbeitungsbestand ( $VB_m(t)$ ) und anschließend über die Produktrate ( $PR_m(t)$ ) zum Bestand der Produkte ( $P_m(t)$ ). Wie in den oben aufgeführten Integralgleichungen ersichtlich wird, bestimmen die Flussgrößen die Veränderungen der Bestandsgrößen und bilden folglich die Bewegung von Produkten in der Produktionsprozesskette ab. Der Fluss über die Transport- und Übergangsrate erfolgt hierbei bedarfsorientiert, wenn keine Restriktionen durch die Bestandsgrößen Pufferbestand, Verarbeitungsbestand oder Produkte vorliegen. Demgegenüber orientiert sich die Produktrate an der Zykluszeit. Da im Idealfall in einem Produktionsprozess ein Produkt pro verstrichener Zykluszeit fließt, ist hierbei die Zykluszeit eines Produktionsprozesses entscheidender Faktor für die Flussgeschwindigkeit. Die Produktrate ist auf die Zykluszeit normiert. Allerdings kann der Fluss eines Produktionsprozesses zum Stillstand kommen, wenn mindestens ein zeit- oder qualitätsbezogener Verlust ( $V_m(t)$ ) eintritt und auf die Produktrate ( $PR_m(t)$ ) einwirkt, was durch die Formel (5.8) abgebildet wird.

$$PR_m(t) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } V_m(t) = 0 \\ 0, & \text{wenn } V_m(t) = 1 \end{cases} \quad (5.8)$$

mit  $V_m(t)$  Verluste eines Produktionsprozesses  $m$  zum Zeitpunkt  $t$

Wenn keine Verluste vorliegen, wird am Ende der Zykluszeit ein Produkt weitergereicht. Demzufolge nimmt die Produktrate den Wert eins an und reicht Produkte weiter, wenn keine Verluste vorliegen und der maximale Pufferbestand des nachgelagerten Puffers nicht erreicht ist. Liegt jedoch zum Zeitpunkt  $t$  ein Verlust vor, so sinkt die Produktrate auf den Wert null ab.

Die Verluste, die den Fluss an Produkten zum Stillstand bringen können, werden in dem System-Dynamics-Modell über Zusatzvariablen abgebildet. Die entwickelten Zusatzvariablen des System-Dynamics-Modells werden nachstehend erläutert.

### **Zusatzvariablen**

Durch Zusatzvariablen können die Abläufe des Flussdiagramms über Konstanten, aber auch über Funktionen detaillierter und realitätsnäher beschrieben werden. Dadurch soll auch die Nachvollziehbarkeit und Transparenz des System-Dynamics-Modells für Anwender erhöht werden. Über die Zusatzvariablen können allgemeine sowie informationsbedingte Beeinträchtigungen des zu untersuchenden informati-

onsflussorientierten Wertstroms quantifiziert und stochastisches Verhalten abgebildet werden. Abbildung 5.20 zeigt die eingeführten Verlustarten in Bezug auf das System-Dynamics-Modell sowie ihr Pendant im Wertstrom auf.

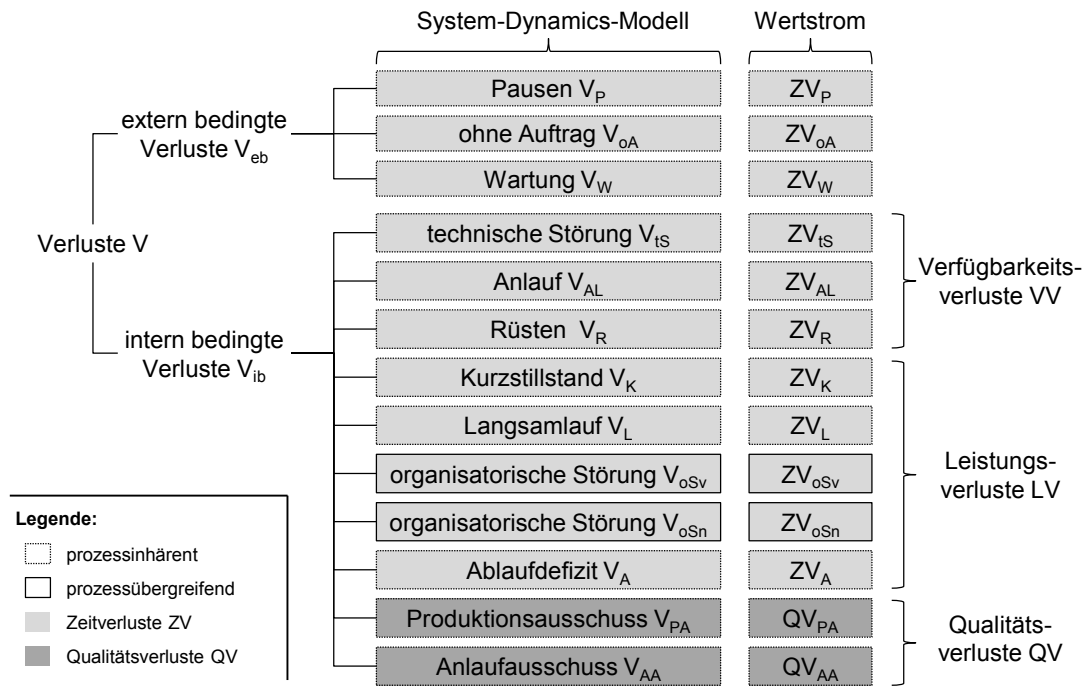


Abbildung 5.20: Übersicht und Zuordnung der Verlustarten zwischen System-Dynamics-Modell und Wertstrom

Die vorstehend skizzierten Verluste ( $V_m(t)$ ) bilden eine Aggregation unterschiedlicher Verlustarten. Im Folgenden werden zur Beschreibung der Verlustarten Zusatzvariablen eingeführt, die das System-Dynamics-Modell weiter spezifizieren. Die nachstehend erläuterten Zusatzvariablen nehmen hierbei Bezug auf die Zeit- und Qualitätsverluste zu betrachtender Wertströme (vgl. Abschnitt 5.2.6), die innerhalb einzelner Produktionsprozesse aber auch als Resultat der Verkettung mehrerer Produktionsprozesse über Transport- und Puffervorgänge auftreten können.

Die Verluste sind hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Flussgrößen normiert. Tritt mindestens ein Verlust in einem Produktionsprozess auf, so kommt der Fluss entsprechend dem spezifischen Verhalten der jeweiligen Verlustart zum Stillstand. Nachstehend werden die Verlustarten im System-Dynamics-Modell und die zugehörigen Zeit- und Qualitätsverluste im Wertstrom erläutert.

Verluste durch Pausen ( $V_P$ ), Verluste zu Zeiten, während kein Produktionsauftrag vorliegt ( $V_{oA}$ ), und Verluste, während Wartungsarbeiten an Betriebsmitteln durchgeführt werden ( $V_W$ ), zählen zu extern bedingten Verlusten, da diese nicht durch die betrachteten Produktionsprozesse selbst oder durch vor- und nachgelagerte Produktionsprozesse verursacht werden. Im Wertstrom äußern sie sich über die Dimension Zeit in Form von entsprechenden Zeitverlusten wie beispielsweise Zeitverluste durch betrieblich vorgegebene Pausen ( $ZV_P$ ), Zeitverluste aufgrund mangelnder Produktionsaufträge ( $ZV_{oA}$ ) und Zeitverluste bedingt durch Wartung ( $ZV_W$ ). Diese Verluste können in dem System-Dynamics-Modell für jeden Produktionsprozess einzeln definiert werden. Da Pausen in der Produktion für unterschiedliche Produktionsprozesse oftmals zur selben Zeit stattfinden, lassen sich diese in dem System-Dynamics-Modell auch zentral und einheitlich für die Produktionsprozesse der Produktionsprozesskette parametrieren.

Die intern bedingten Verluste lassen sich entsprechend ihrer Wirkung nach den beiden Dimensionen Zeit und Qualität differenzieren. Zu den zeitlichen Verlusten zählen Verluste durch technische Störung ( $V_{tS}$ ), Anlauf ( $V_{AL}$ ), Rüsten ( $V_R$ ), Kurzstillstand ( $V_K$ ), Langsamlauf ( $V_L$ ), organisatorische Störung vorgelagert ( $V_{oSv}$ ), organisatorische Störung nachgelagert ( $V_{oSn}$ ) und Ablaufdefizit ( $V_A$ ). Sie äußern sich im Wertstrom über die Dimension Zeit durch entsprechende Zeitverluste: Zeitverlust durch technische Störung ( $ZV_{tS}$ ), Anlauf ( $ZV_{AL}$ ), Rüsten ( $ZV_R$ ), Kurzstillstand ( $ZV_K$ ), Langsamlauf ( $ZV_L$ ), organisatorische Störung vorgelagert ( $ZV_{oSv}$ ), organisatorische Störung nachgelagert ( $ZV_{oSn}$ ) und Ablaufdefizit ( $ZV_A$ ). Bei einer technischen Störung an den Betriebsmitteln einer Arbeitsstation sind diese für den Leistungserstellungsprozess nicht verfügbar. Demgegenüber handelt es sich bei einem Kurzstillstand oder Langsamlauf um einen kurzzeitigen Leistungsausfall, dessen Ursachen vom Maschinenbedienungspersonal routinemäßig behoben werden. Die Ausfälle durch die drei Verlustarten technische Störung, Kurzstillstand und Langsamlauf sind vergleichbar modelliert. Sie besitzen jeweils spezifische Werte für die Verfügbarkeit und werden näher durch die mittlere Reparaturdauer eines Betriebsmittels (MTTR) und die mittlere ausfallfreie Zeit eines Betriebsmittels (MTBF) spezifiziert (BIROLINI 1997), wodurch unterschiedliches Ausfallverhalten abgebildet werden kann. Ihre jeweilige Verfügbarkeit ( $\eta$ ) lässt sich nach Formel (5.9) entsprechend den Zeitanteilen bestimmen, in denen eine betrachtete Ressource einsatzbereit ist bzw. ihre Funktionsfähigkeit aufgrund einer Störung wiederhergestellt werden muss (VDI 3649, VDI 4486).



$$\eta = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (5.9)$$

mit  $\eta$  Verfügbarkeit  
 MTBF mittlere ausfallfreie Zeit  
 MTTR mittlere Reparaturdauer

Im System-Dynamics-Modell erfolgt die Modellierung des stochastischen Verhaltens von MTTR und MTBF während der Simulationsläufe jeweils mittels eines sogenannten Zustandsübergangsdiagramms. In diesem wird der aktuelle Zustand bezüglich eines Ausfalls als aktiv mit dem Wert eins und als inaktiv mit dem Wert null abgebildet, wenn die im Zustandsübergangsdiagramm definierten Bedingungen jeweils entsprechend erfüllt sind. Um die Eigenschaften der jeweiligen Verluste realitätsnah nachzubilden, sind diese jeweils spezifisch über entsprechende Zustandsübergangsdiagramme modelliert. Abbildung 5.21 zeigt ein beispielhaftes Zustandsübergangsdiagramm zu Verlusten durch technische Störung ( $V_{TS}$ ), das drei Zustände, 13 Bedingungen und eine Aktion innehat.

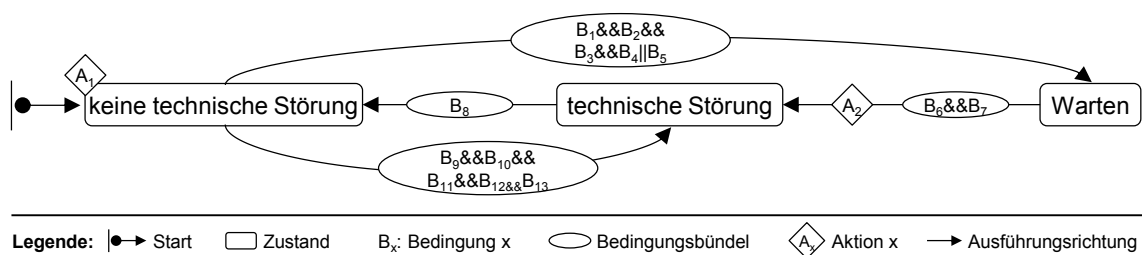


Abbildung 5.21: Zustandsübergangsdiagramm am Beispiel der Verluste durch technische Störung ( $V_{TS}$ )

Da die MTTR und MTBF in der Regel stochastisches Verhalten aufweisen und um einen Durchschnittswert streuen, erfolgen die Modellierung der MTTR über eine Gamma-Verteilung und die Modellierung der MTBF über eine Bernoulli-Verteilung.

Durch das Zustandsübergangsdiagramm wird ein zufälliger Zeitpunkt für den Beginn eines Ausfalls generiert, wodurch der laufende Produktionsprozess zum Stillstand kommt. Die mittlere Reparaturdauer bestimmt sich nach der in Formel (5.10) dargestellten Gamma-Verteilung (KOŠTURIK & GREGOR 1995). Hierbei ist die Gamma-Funktion  $\Gamma$  in Formel (5.11) näher spezifiziert.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{-x}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, & \text{wenn } x > 0 \\ 0, & \text{wenn } x \leq 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

$$\Gamma(g) = \int_0^{\infty} e^{-t} \cdot t^{g-1} dt \quad (5.11)$$

mit	f(x)	Funktion von x
	$\alpha$	Formparameter
	$\beta$	Skalierungsparameter
	e	eulersche Zahl
	$\Gamma$	Gamma-Funktion
	g	Element ganzer Zahlen

In der Simulationssoftware AnyLogic wird die Gamma-Verteilung, wie nachstehend aufgeführt, abgebildet (THE ANYLOGIC COMPANY 2020). Liegt ein minimaler Wert der mittleren Reparaturdauer MTTR in einem betrachteten Verlust vor, so kann dies nach Formel (5.12) über eine minimale mittlere Reparaturdauer spezifiziert werden.

$$f_{\text{MTTR}}(x) = \frac{(x - \text{min})^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot e^{-\frac{x-\text{min}}{\beta}} \quad (5.12)$$

mit min      minimale mittlere Reparaturdauer

Die Parameter der Gamma-Funktion sind in der Verifikation und Validierung des System-Dynamics-Modells für  $V_{\text{IS}}$ ,  $V_{\text{K}}$  und  $V_{\text{L}}$  zu untersuchen und bei Bedarf anzupassen. Die MTBF beschreibt die Dauer zwischen zwei unabhängigen Ereignissen, zu deren Modellierung eine Exponentialverteilung auf Basis der Ausfallrate ( $\lambda$ ) nach Formel (5.13) geeignet ist (KOŠTURIK & GREGOR 1995, BIROLINI 1997).

$$f_{\text{MTBF}}(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & \text{wenn } x \geq 0 \\ 0, & \text{wenn } x < 0 \end{cases} \quad (5.13)$$

mit  $\lambda$       Ausfallrate

Die Werte für die Parametrierung der Verfügbarkeit, MTTR und MTBF bzw.  $\lambda$  hinsichtlich  $V_{\text{IS}}$ ,  $V_{\text{K}}$  und  $V_{\text{L}}$  sollten aus entsprechenden Systemen, über die Produktionsdaten dokumentiert werden, wie beispielsweise MES, Maschinendatenerfassung oder

Betriebsdatenerfassung entnommen werden (KLETTI & SCHUMACHER 2014, NYHUIS ET AL. 2015, SCHNELLBACH 2016). Dadurch wird eine möglichst genaue produktionskettenspezifische Parametrierung des System-Dynamics-Modells hinsichtlich des stochastischen Verhaltens von technischen Störungen, Kurzstillstand und Langsamlauf ermöglicht.

Durch Verluste aufgrund von Anlauf ( $V_{AL}$ ) und Rüsten ( $V_R$ ) können zeitliche Einbußen sowohl von anlaufenden Betriebsmitteln als auch von durchzuführenden Rüstvorgängen abgebildet werden. Der Anlauf von Betriebsmitteln kann zu Produktionsbeginn simuliert werden, während Rüstvorgänge vor der Bearbeitung neuer Lose auftreten, da beispielsweise ein Werkzeugwechsel für die Herstellung einer anderen Produktfamilie erforderlich ist. Ist ein Rüstvorgang nach einem abgeschlossenen Los erforderlich, so lässt sich die Rüstzeit in dem System-Dynamics-Modell auf zwei Arten quantifizieren: Entweder werden Rüstzeiten zu definierten Wechseln zwischen Produktvarianten über eine Rüstmatrix vorgegeben oder es werden Rüstzeiten über eine stochastische Normalverteilung mittels zugehöriger Mittelwerte und Standardabweichungen parametrisiert. Neben diesen produktwechselbedingten zeitlichen Verlusten können weitere Verluste auftreten, wenn die für den jeweiligen Rüstvorgang erforderliche Zeit bis zur nächsten Pause nicht ausreicht. In diesem Fall wird der Fluss bis zum Ende der Pause unterbrochen, ehe der Rüstvorgang durchgeführt wird. Diese Zusammenhänge sind ebenso über Zustandsübergangsdiagramme modelliert.

Organisatorische Störungen bewirken den Stillstand von Produktionsprozessen, der in vor- und nachgelagerten Produktionsprozessen begründet ist. Derartige Störungen können dadurch bedingt sein, dass die einzelnen Produktionsprozesse einer Produktionsprozesskette nicht ausreichend aufeinander abgestimmt sind und es so zu kontinuierlichen oder wiederkehrenden Verlusten kommt. Die Ursachen können beispielsweise darin liegen, dass die Produktionsprozesse unterschiedliche Kapazitäten oder unterschiedliche Ausbringungsmengen pro Zeiteinheit haben. So können Produktionsprozesse zum Stillstand kommen, da keine Produkte zur Weiterverarbeitung vorliegen oder aufgrund eines überlasteten nachfolgenden Produktionsprozesses fertiggestellte Produkte nicht weitergereicht werden. Organisatorische Störungen werden nach dem Ort ihrer Ursache in Verluste durch organisatorische Störungen bedingt durch den vorgelagerten Prozess ( $V_{oSv}$ ) und Verluste durch organisatorische Störungen bedingt durch den nachgelagerten Prozess ( $V_{oSn}$ ) unterschieden.

Zeitliche Verluste durch Ablaufdefizite ( $V_A$ ) sind Folgen einer unzureichenden Organisation bezüglich der Abläufe von Produktionsprozessen. Sie spiegeln sich bei-

spielsweise in Ineffizienzen der Prozesse wider, die von Mitarbeitern ausgeübt werden. Diese Ineffizienzen, die sich oftmals in unnötigen Transporten, Bewegungen oder Wartezeiten äußern, können auf unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden. Zu Ursachen zählen beispielsweise ein ungeeignetes Werks- oder Arbeitsplatzlayout, eine schlechte Anordnung von Ressourcen an einer Arbeitsstation oder eine unausgereift geplante Mehrmaschinenbedienung. Darüber hinaus können zeitliche Verluste auf Ineffizienzen zurückgeführt werden, die durch informationsbedingte Verschwendung verursacht werden. Beispiele hierfür sind in Abschnitt 5.3.3 aufgeführt. Ablaufdefizite sind jedoch in der Regel nicht aus historischen Kennwerten ablesbar, sondern sie sind Ergebnis der Analyse von Abläufen in Produktionsprozessen. Da Ablaufdefizite wiederkehrend sind und ihre Dauer mit ihrem Mittelwert und der zugehörigen Standardabweichung spezifiziert werden können, werden sie in dem System-Dynamics-Modell mit einer Normalverteilung abgebildet.

Neben den oben aufgeführten zeitbezogenen Verlusten, die in den Produktionsprozessen einer Produktionsprozesskette auftreten können, bildet das System-Dynamics-Modell auch die beiden qualitätsbezogenen Verluste Produktionsausschuss ( $V_{PA}$ ) und Anlaufausschuss ( $V_{AA}$ ) ab. Im System-Dynamics-Modell wird hierbei die Anzahl von als Produktionsausschuss oder Anlaufausschuss beurteilten Produkten widerspiegelt. In einem realen Produktionsprozess äußern sich Qualitätsverluste in der Anzahl von Produkten, die Produktionsausschuss ( $QV_{PA}$ ) und Anlaufausschuss ( $QV_{AA}$ ) in einem betrachteten Zeitrahmen sind. Für den Fall eines Produktionsausschusses nimmt die Produktrate den Wert null und die Ausschussrate den Wert eins an. Ausschuss wird nicht rezykliert, sodass jeder Produktionsausschuss durch zusätzliche Produktionsvorgänge zu kompensieren ist, um einen definierten Tagesbedarf zu erreichen. Die Modellierung erfolgt in einem Zustandsübergangsdiagramm, das während der Simulation die Wahrscheinlichkeit über einen booleschen Wert nach einer Bernoulli-Verteilung abbildet. Dadurch wird ein zufälliges Auftreten von Produktionsausschuss im System-Dynamics-Modell auf Grundlage einer durch historische Produktionsdaten bestimmten Rate an Produkten abgebildet. Neben zeitlichen Verlusten im Anlauf der Betriebsmittel ( $V_{AL}$ ) können auch qualitätsbezogene Verluste im Anlauf ( $V_{AA}$ ) auftreten, da Ausschussprodukte hergestellt werden, die irreparable Fehler aufweisen und als Ausschuss einzustufen sind. Diese Verluste durch Anlaufausschuss ( $V_{AA}$ ) werden in dem System-Dynamics-Modell vergleichbar wie der Produktionsausschuss mittels einer Bernoulli-Verteilung abgebildet.

Alle aufgeführten Verluste, ausgenommen  $V_P$ ,  $V_W$ ,  $V_{oSv}$  und  $V_{oSn}$ , sind über Zustandsübergangsdiagramme modelliert, wie in Abbildung 5.21 beispielhaft anhand der Verluste durch technische Störung dargestellt wurde.

Über die eingeführten zeit- und qualitätsbezogenen Verluste sowie über die informationsflussorientierte Wertstrommethode (Abschnitte 6.2 und 6.3) können darauf aufbauend Einflüsse von Prozessen des Informationsflusses unter Berücksichtigung informationslogistischer Aspekte abgebildet und simulativ untersucht werden.

### **Spezifische Bestimmungen zur Abbildung einer Produktionsprozesskette**

In der beschriebenen Modellierung werden die einzelnen Puffer und Produktionsprozesse in AnyLogic mittels Agenten abgebildet. Agenten sind Objekte der Simulation, die mit anderen Objekten interagieren können (GRIGORYEV 2018). Ein Agent repräsentiert hierbei die grundlegenden Eigenschaften eines Puffers und ein weiterer Agent die grundlegenden Eigenschaften eines Produktionsprozesses. Um eine gesamte Produktionsprozesskette in dem System-Dynamics-Modell abzubilden, wird für die Modellierung ein dritter Agent entwickelt. Dieser Agent ist hierarchisch übergeordnet und ruft die beiden untergeordneten Agenten, die individuell die einzelnen Puffer und Produktionsprozesse einer Produktionsprozesskette abbilden, während der Simulation bei entsprechenden Ereignissen auf. Wird eine Produktionsprozesskette im System-Dynamics-Modell abgebildet, so findet der Agent zur Produktionsprozesskette genau einmal Verwendung, während die Agenten zu den Puffern und Produktionsprozessen entsprechend der Länge der Produktionsprozesskette mehrmals gemäß einem modularen Aufbau des Modells verwendet werden können. Um die Interaktion zwischen den Agenten der Puffer und Produktionsprozesse logisch zu ermöglichen und deren Verkettung herzustellen, sind die zugehörigen Agenten hinsichtlich der jeweils vor- und nachgelagerten Puffer und Produktionsprozesse zu parametrieren.

### **5.4.7 Verifikation und Validierung der Modellbildung**

Simulationsmodelle entstehen über mehrere Schritte der Abstraktion sowie Idealisierung und durch das Abbilden signifikanter Zusammenhänge der Realität in einer simulierbaren Umgebung (VDI 3633-1). Diese Schritte können jedoch mit Fehlern und Inkonsistenzen behaftet sein (LAW 2009), weshalb mit jeweils geeigneten Techniken der Verifizierung und Validierung (V&V-Techniken)<sup>12</sup> zu prüfen ist, ob sich die durchgeführten Abstraktionen und Idealisierungen eignen und die Ergebnisse der Schritte der Simulationsmodellbildung richtig sind (LAW 2009, VDI 3633-1). Durch diese Techniken soll wirksam verhindert werden, dass aus Simulationsexperimenten

---

<sup>12</sup> Eine ausführliche Beschreibung von V&V-Techniken ist in STERMAN (2000) und RABE ET AL. (2008B) zu finden.

gewonnene Aussagen fehlerhaft sind und aus diesen Aussagen Fehlentscheidungen abgeleitet werden (RABE ET AL. 2008A, 2008B).

Geeignete V&V-Techniken nach RABE ET AL. (2008B), die bei der Entwicklung des System-Dynamics-Modells verwendet wurden, sind in Tabelle 5.5 aufgeführt und durchgeführte Tätigkeiten stichpunktartig und verdichtet beschrieben.

*Tabelle 5.5: Verwendete V&V-Techniken zur Verifikation und Validierung der Entwicklung des System-Dynamics-Modells*

<b>V&amp;V-Technik</b>	<b>Beschreibung</b>
Begutachtung und strukturiertes Durchgehen	Überprüfung des Quelltextes durch Visualisierung in UML-Diagrammen und Abgleich der Konformität von Quelltexten mit UML-Diagrammen
Dimensionstest	Prüfung implementierter Formeln hinsichtlich der korrekten Dimension
Ereignisvaliditätstest	Sicherstellung, dass kein gleichzeitiger Fluss von Produkten über Produkt-rate und Ausschussrate eintritt; Vergleich vom Verhalten des Auftretens der Verluste; Sicherstellung des alleinigen Auftretens von Verlusten, die in einem realen Produktionssystem nicht gleichzeitig vorliegen können
Festwerttest und Grenzwerttest	Überprüfung des Verhaltens des Simulationsmodells bei Simulationsläufen mit Festwerten und Grenzwerten/Extremwerten von Verlusten
Monitoring	Graphische und diagrammbasierte Prüfung von Flussgrößen, Bestandsgrößen und Verlusten über die Simulationslaufzeit
Schreibtischtest	Überprüfung von Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz und Eindeutigkeit
Sensitivitätsanalyse	Veränderung von Parametern des Simulationsmodells und Überprüfung hinsichtlich Konformität der Auswirkungsrichtung
Statistische Techniken	Überprüfung des stochastischen Verhaltens von Produktionsprozessen mit zu erwartendem Verhalten in der Realität
Test der internen Validität	Wiederholte Durchführung von Simulationsläufen mit gleichen Parametern und iterative Modellanpassungen zur Reduzierung von Abweichungen berechneter Werte
Trace-Analyse	Überprüfung ausgegebener Datenreihen von Flussgrößen, Bestandsgrößen und Verlusten; Abgleich der Datenreihen mit Diagrammen des Monitorings
Ursache-Wirkungs-Graph	Graphische Überprüfung des Verhaltens der Verluste
Validierung im Dialog	Diskussion mit Experten zu einer simulierten Produktionsprozesskette eines realen Produktionssystems
Vergleich mit aufgezeichneten Daten	Überprüfung und Abgleich mit aufgenommenen Wertstromdaten und Ermittlung der Abweichungen von Verlusten und Zielgrößen

Die Techniken der Verifizierung beschreiben formale Prüfungen, um die Korrektheit des Simulationsmodells abzusichern (VDI 3633). Durch die Techniken der Validierung hingegen soll eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Modell und den Produktionsprozessketten betrachteter Wertströme sichergestellt werden, indem durch iterative Prüf- und Korrekturvorgänge abgesichert wird (RABE ET AL. 2008A, VDI 3633-1), dass das Modell das betrachtete reale System „(...) genau genug und fehlerfrei widerspiegelt“ (VDI 3633). Bei der Überprüfung des System-Dynamics-Modells hinsichtlich Plausibilität, Eignung und Erfüllung von Anforderungen kann es erforderlich sein, im Sinne der Verifizierung und Validierung Anpassungen und Korrekturen auch in vorgelagerten und bereits durchgeführten Schritten der Modellbildung vorzunehmen (STERMAN 2000, WENZEL ET AL. 2008).

## 5.5 Fazit

In dem vorliegenden Kapitel wurden für das Strukturmodell zur Integration digitaler Technologien die Formalisierung, die informationsbezogenen Gestaltung sowie die Modellierung von Wirkzusammenhängen im Problemkontext der vorliegenden Arbeit hergeleitet und entwickelt. Die Formalisierung ermöglicht die Klassifizierung von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien entsprechend ihren Fähigkeiten hinsichtlich Transformationsarten und Funktionen nach den Ebenen Ausführung, Daten- und Informationsträger sowie Führung und Leitung. Darüber hinaus wurde eine Schematisierung eingeführt, die Informations- und Materialflüsse von Informationsflussteilnehmern eines Informationssystems gesamtheitlich in Bezug auf ihre prozessuale Abfolge sowie in Bezug auf ihre informationsbezogenen Abhängigkeiten darstellen kann. Bezüglich einer informationsbezogenen Gestaltung von Wertströmen wurde eine Zielsetzung hergeleitet, wie Informationsfluss und Informationslogistik zur Unterstützung eines verschwendungsarmen Wertstroms zu gestalten sind. In diesem Zusammenhang wurden informationsbedingte Verschwendungsarten sowie informationsbezogene Gestaltungsansätze hergeleitet, um zum einen informationsbedingte defizitäre Abläufe und Probleme im Wertstrom beschreiben und zum anderen gestaltungsansatzbasierte Maßnahmen zur Behebung defizitärer Abläufe und Probleme ableiten zu können. Für die Beschreibung von Wirkzusammenhängen in Wertströmen und ihren Produktionsprozessketten wurde ein verifiziertes und validiertes Simulationsmodell basierend auf dem System-Dynamics-Ansatz entwickelt. Durch dieses Simulationsmodell lassen sich in betrachteten Wertströmen die Auswirkungen veränderter Parameter von Produktionsprozessen untersuchen und die Werte der Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme ermitteln.

Die im nachstehenden Kapitel 6 vorgestellte Vorgehensweise greift im Rahmen der informationsflussorientierten Wertstromanalyse, des informationsflussorientierten Wertstromdesigns sowie der Bewertung der Integration digitaler Technologien auf das hergeleitete und entwickelte Strukturmodell zurück.



## 6 Vorgehensweise zur Integration digitaler Technologien

### 6.1 Überblick

Das Kapitel 6 beschreibt die Vorgehensweise zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme. Hierbei findet das in Kapitel 5 hergeleitete und entwickelte Strukturmodell in den Schritten der Vorgehensweise Verwendung, wie in Abbildung 6.1 aufgezeigt wird.

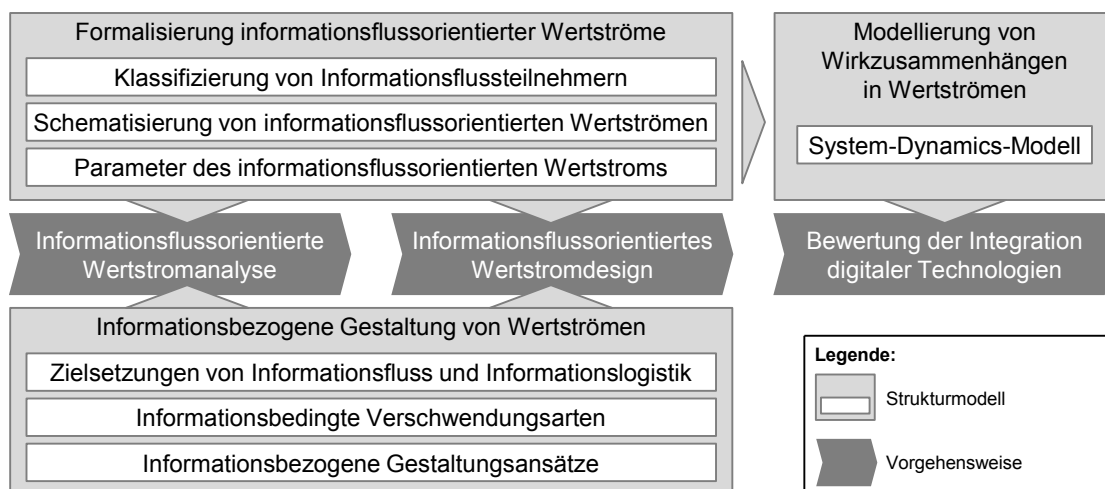


Abbildung 6.1: Einbindung des Strukturmodells in die Schritte der Vorgehensweise

Abschnitt 6.2 beschreibt in diesem Zusammenhang die informationsflussorientierte Wertstromanalyse, während Abschnitt 6.3 auf das informationsflussorientierte Wertstromdesign eingeht. In Abschnitt 6.4 wird der letzte Schritt der Vorgehensweise dargestellt, in dem die Bewertung der Integration digitaler Technologien erfolgt. Das Kapitel schließt mit einem Fazit in Abschnitt 6.5.

## 6.2 Informationsflussorientierte Wertstromanalyse

### 6.2.1 Beschreibung der Vorgehensweise

Die Vorgehensweise der informationsflussorientierten Wertstromanalyse untergliedert sich in vier Schritte. Zunächst werden die zu betrachtende Produktfamilie und die zugehörige Produktionsprozesskette des Wertstroms ermittelt (Abschnitt 6.2.2),

bevor die informationsflussorientierte Wertstromaufnahme auf Makro- und Mikroebene erfolgt (Abschnitt 6.2.3). Im Anschluss wird Verschwendung im aufgenommenen Wertstrom anhand der klassischen und der informationsbedingten Verschwendungsarten identifiziert (Abschnitt 6.2.4). Abschließend werden informationsbedingte Ursachen zu den identifizierten Verschwendungen in einer Ursache-Wirkungs-Analyse ermittelt (Abschnitt 6.2.5).

### 6.2.2 Ermittlung der Produktfamilie und Produktionsprozesskette

Da eine vollständige Erfassung aller Produktionsabläufe eines Produktionssystems in der Regel mit unverhältnismäßigem Aufwand verbunden ist, wird empfohlen, den Untersuchungsgegenstand zunächst auf eine isolierte Betrachtung von ausgewählten Teilbereichen zu beschränken (VDI 4400-2). Daher erfolgt im Rahmen der Vorgehensweise zunächst eine Beschränkung auf eine Produktfamilie, die durch die zugehörige Produktionsprozesskette hergestellt wird. Um die den Produktfamilien zugehörigen Produktvarianten zu identifizieren, werden die Produktionsprozesse, die für die Herstellung der Produktvarianten erforderlich sind, anhand einer Produktfamilienmatrix dokumentiert und Produktfamilien anhand prozessualer Ähnlichkeiten gebildet (ERLACH 2010). Eine prozessuale Ähnlichkeit unterschiedlicher Produktvarianten ist gegeben, wenn die gleichen Produktionsprozesse zur Herstellung der jeweiligen Produktvarianten benötigt werden und ein vergleichbarer zeitlicher Rahmen des Kundentakts vorliegt. Anhand der gleichen Produktionsprozesse und des vergleichbaren Kundentakts lassen sich entsprechende Produktvarianten zu einer Produktfamilie zusammenfassen. In dem in Tabelle 6.1 aufgeführten Beispiel lässt sich auf die Zugehörigkeit der Produktvarianten zu A und E sowie zu C und D zur jeweils gleichen Produktfamilie schließen. Im weiteren Verlauf sollen insbesondere stückzahlintensive Produktfamilien und die Wertströme zugehöriger Produktionsprozesse weiter betrachtet werden.

*Tabelle 6.1: Beispiel einer Produktfamilienmatrix*

Produktvariante	PP <sub>1</sub>	PP <sub>2</sub>	PP <sub>3</sub>	PP <sub>4</sub>	PP <sub>5</sub>	Kundentakt	Produktfamilie
A		x	x	x	x	65 s	I
B		x	x		x	60 s	II
C	x	x		x	x	80 s	III
D	x	x		x	x	80 s	III
E		x	x	x	x	70 s	I

**Legende:** PP: Produktionsprozess

### 6.2.3 Informationsflussorientierte Wertstromaufnahme

Die Wertstrommethode wird von einem Großteil produzierender Unternehmen angewendet (HÄMMERLE & RALLY 2010). Folglich ist ihr grundlegender Aufbau in vielen Unternehmen bereits bekannt und etabliert. Deshalb wurde in Abschnitt 5.2 ausgehend von diesem grundlegenden Aufbau die Formalisierung informationsflussorientierter Wertströme entwickelt, die im weiteren Verlauf der entwickelten Vorgehensweise verwendet wird, um die Integration digitaler Technologien zu untersuchen. Die Wertstromaufnahme wird auf Makro- und Mikroebene durchgeführt. Die Makroebene stellt die übergeordnete Struktur dar, welche die innerbetriebliche Produktionsprozesskette zwischen Lieferanten und Kunden sowie die Informationsflussteilnehmer abbildet. Die detaillierte und verstärkt informationsflussorientierte Beschreibung des Wertstroms hinsichtlich der Produktionsprozesse und der Prozesse des Informationsflusses erfolgt auf der Mikroebene. Grundsätzlich ist es bei der Anwendung der informationsflussorientierten Wertstrommethode freigestellt, neben den eingeführten Merkmalen und Parametern auch weitere Größen aufzunehmen und näher zu betrachten. Jedoch sind die definierten Merkmale und Parameter verpflichtend aufzunehmen, um zum einen den verstärkten Bezug zum Produktionsfaktor Information herzustellen und zum anderen eine hohe Aussagekraft der simulationsgestützten Betrachtung hinsichtlich vorliegender Wirkzusammenhänge zu ermöglichen. Nachstehend wird in Bezug auf die entwickelte Vorgehensweise die informationsflussorientierte Wertstromaufnahme auf Makro- und Mikroebene beschrieben.

#### **Informationsflussorientierte Wertstromaufnahme auf Makroebene**

Auf Makroebene werden die übergeordneten Zusammenhänge des Wertstroms abgebildet. Hierfür sind zunächst die Beziehungen an der Systemgrenze der ausgewählten Produktionsprozesskette zu den Lieferanten und zu den Kunden aufzunehmen. Bei den Beziehungen kann es sich in Abhängigkeit der betrachteten Produktionsprozesskette um interne oder externe Beziehungen zu Lieferanten und Kunden handeln. Folglich können neben externen Beziehungen beispielsweise auch innerbetriebliche vor- und nachgelagerte Produktionsprozesse als Lieferanten oder Kunden interpretiert werden. Während Kunden ihren Bedarf an herzustellenden Produktvarianten für einen vorgegebenen Zeitrahmen festlegen, wird an Lieferanten der Bedarf an Vorprodukten übermittelt. In diesem Zusammenhang sind Eckdaten zum Produktionssystem der betrachteten Produktionsprozesskette wie Anzahl Arbeitstage (#AT), Tagesbedarf (TB), Produktionslaufzeit (PLZ), tägliche Arbeitszeit (tAZ) sowie die Taktzeit (TZ) zu erfassen und zu ermitteln. Aus der verfügbaren Arbeitszeit und dem

Kundenbedarf lässt sich entsprechend der Kundentakt ableiten. Die zu erfassenden Parameter sind in Abbildung 6.2 aufgeführt.

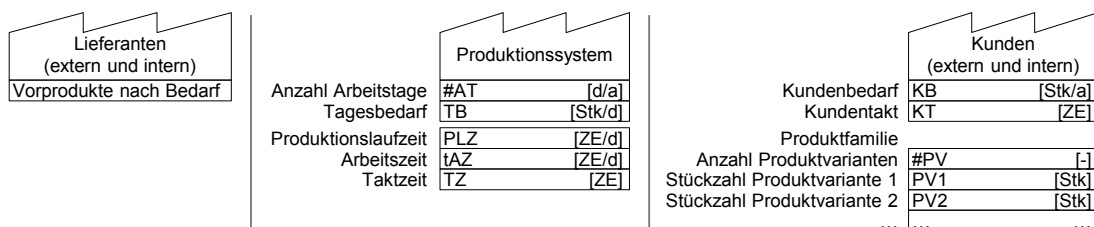


Abbildung 6.2: Parameter zu Lieferanten, Produktionssystem und Kunden

Anschließend werden die Produktionsprozesse der Produktionsprozesskette sowie die dazwischenliegenden Materialbewegungen erfasst. Hierbei sind ergänzend zu den physischen Parametern hinsichtlich prozessualer Größen oder Bestände auch die jeweiligen Informationsflussteilnehmer der Ebene 1 zu den einzelnen Produktionsprozessen und Puffern abzubilden. Unter Berücksichtigung der entwickelten Formalisierung beziehen sich diese Größen auf die in den Abschnitten 2.2.2, 2.2.3, 5.2 und 5.4 beschriebenen Parameter. Zu den eingeführten Zeit- und Qualitätsverlusten sind im Rahmen der Wertstromaufnahme entsprechende Daten und Informationen aufzunehmen, die im betrachteten Zeitrahmen auftreten können. Liegen historische Produktionsdaten vor, die Rückschlüsse auf die zu erhebenden Zeit- und Qualitätsverluste ermöglichen, so können diese zusätzlich verwendet werden.

Auf dieser Grundlage kann der Wertstrom zur gesamten Produktionsprozesskette in einer Übersicht abgebildet werden. Zusätzlich zu den bereits aufgeführten Größen und Parametern sind ergänzend weitere Informationsflussteilnehmer der Ebenen 2 und 3 aufzuführen. Entgegen der produktionsprozessspezifischen Erfassung der Informationsflussteilnehmer zu Ebene 1 sind bei den Ebenen 2 und 3 alle von der Produktionsprozesskette adressierten Informationsflussteilnehmer abzubilden. In einem weiteren Schritt können anschließend vorhandene und repetitiv auftretende Informationsflüsse zwischen den Informationsflussteilnehmern mit entsprechenden Pfeilsymbolen gekennzeichnet werden. Auf Grundlage der aufgenommenen Produktionsprozesskette und den Materialbewegungen kann in einem weiteren Schritt die Zeitlinie abgeleitet werden, die Bearbeitungs- bzw. Prozesszeiten und Reichweiten bzw. Transportzeiten abbildet und einen ersten Vergleich zwischen der Summe der Zykluszeiten und der Durchlaufzeit ermöglicht. Abbildung 6.3 verdeutlicht diese Zusammenhänge auf der Makroebene beispielhaft anhand dreier Produktionsprozesse und Puffer, wobei die Boxen für die Parameter von Produktionsprozessen und Material-

bewegungen als Platzhalter mit „...“ angedeutet sind. Die Schematisierung und Parameter wurden in den Abschnitten 5.2.5 und 5.2.6 eingeführt.

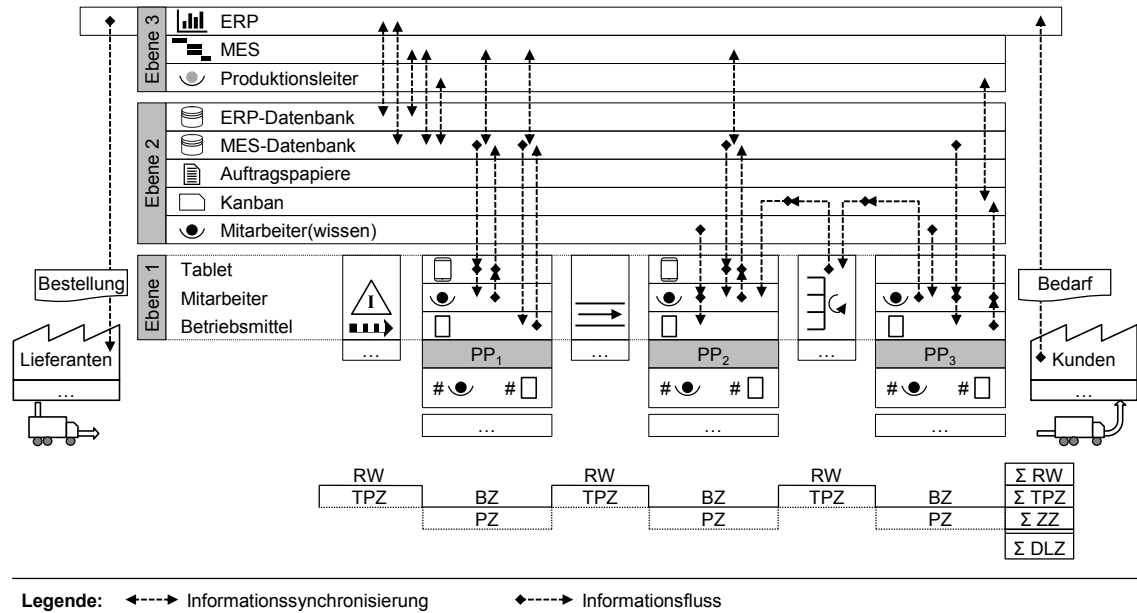


Abbildung 6.3: Informationsflussorientierter Wertstrom auf Makroebene

Der auf Makroebene aufgenommene Wertstrom stellt die erste Detaillierungsstufe dar. Durch die auf Makroebene erfassten Zusammenhänge können auch die Werte zu den Zielgrößen der einzelnen Produktionsprozesse sowie zur gesamten Produktionsprozesskette ermittelt werden. Die Ermittlung der Werte zu den Zielgrößen Durchlaufzeit, Qualitätsgrad, Produktivitätsgrad und Every Part Every Interval orientiert sich an den in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Berechnungen. Die Ermittlung der Werte zu den Zielgrößen der Produktionsprozesskette mit  $n$  Produktionsprozessen erfolgt auf Grundlage der nachstehend aufgeführten Formeln (6.1) bis (6.4).

$$DLZ = \sum_{i=1}^n DLZ_i = \sum_{i=1}^n TPZ_i + \sum_{i=1}^n RW_i + \sum_{i=1}^n ZZ_i \quad (6.1)$$

$$QG = \prod_{i=1}^n QG_i \quad (6.2)$$

$$PG = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n PG_i \quad (6.3)$$

$$EPEI = \max (EPEI_i), \quad \text{mit } i \in [1; n] \quad (6.4)$$

### Informationsflussorientierte Wertstromaufnahme auf Mikroebene

Auf Mikroebene erfolgt die weitere Detaillierung der Wertstromaufnahme. Die Abbildung der Prozesse von Material- und Informationsfluss auf Mikroebene knüpft an der Prozessaufnahme der Makroebene an, indem die dargestellten Zusammenhänge weiter detailliert werden. Hierfür findet die in Abschnitt 5.2.5 vorgestellte Schematisierung Verwendung, bei der Produktionsprozesse hinsichtlich ihrer einzelnen Prozesse des Material- und Informationsflusses aufgeführt werden. Hierbei lassen sich die Informationsflussteilnehmer der Ebenen 1, 2 und 3 anhand ihrer ausgeführten Prozesse und Einbindung im Informationssystem zueinander in Bezug setzen, wodurch prozessuale Abhängigkeiten aufgezeigt werden. Abbildung 6.4 führt diese Detaillierung beispielhaft aufbauend auf dem Produktionsprozess 2 (PP<sub>2</sub>) unter Verwendung von Platzhaltern auf.

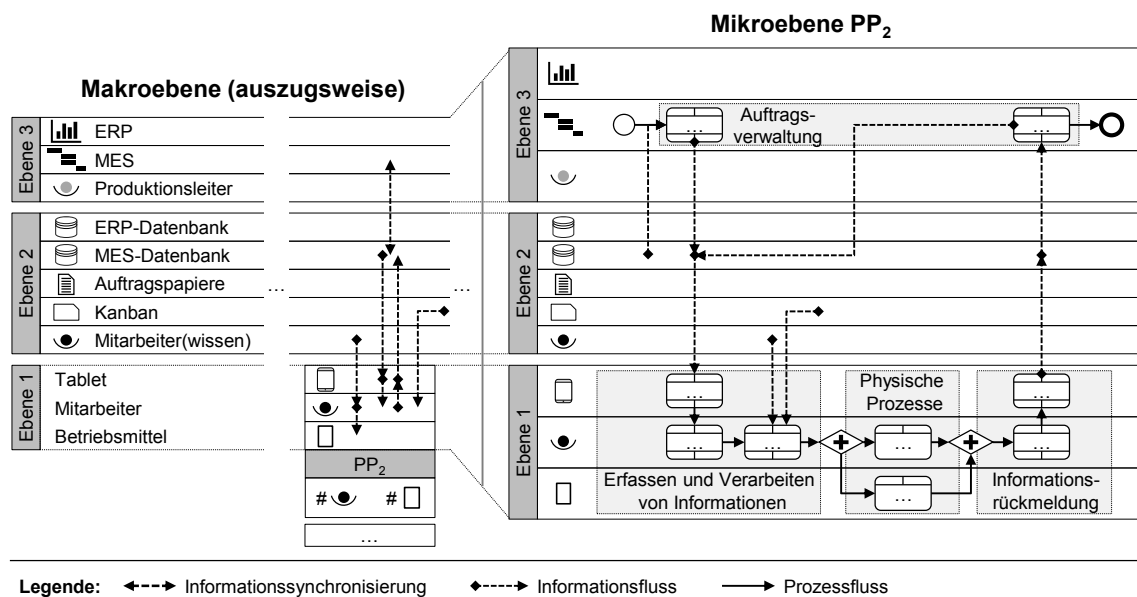


Abbildung 6.4: Informationsflussorientierter Wertstrom auf Mikroebene

Da die in der Mikroebene abgebildete Prozesskette eine Detaillierung der Abläufe im jeweiligen Produktionsprozess darstellt, ist auf Konformität zwischen Makro- und Mikroebene zu achten. Beispielsweise soll die Summe entsprechender Zeiten der ein-

zelen Prozesse auf der Mikroebene der Bearbeitungs- bzw. Prozesszeit auf der Makroebene entsprechen. Anschließend kann zur Aufnahme und Abbildung des informationsflussorientierten Wertstroms die Identifikation von Verschwendung erfolgen.

### 6.2.4 Identifikation von Verschwendung

Aufbauend auf der informationsflussorientierten Wertstromaufnahme auf Makro- und Mikroebene kann in einem nächsten Schritt die Identifikation von informationsbedingter und klassischer Verschwendung erfolgen. Hierfür werden unter Berücksichtigung der Zielsetzungen von Informationsfluss und Informationslogistik (Abschnitt 5.3.2) sowohl die informationsbedingten Verschwendungsarten, die in Abschnitt 5.3.3 hergeleitet und eingeführt wurden, als auch die in Abschnitt 2.2.2 aufgeführten klassischen Verschwendungsarten verwendet. In Abhängigkeit des jeweils aufgenommenen Wertstroms kann die Beurteilung der Prozesse und Zusammenhänge anhand der informationsbedingten und klassischen Verschwendungsarten erfolgen. Identifizierte Verschwendungen können so direkt auf Makro- als auch auf Mikroebene kenntlich gemacht werden. Auch können verhältnismäßig hohe Werte der Parameter, die Bezug zu den definierten zeit- und qualitätsbezogenen Verlustarten nehmen (z. B. Zeitverluste durch technische Störung oder Ablaufdefizit, Qualitätsverluste durch Produktionsausschuss), Indizien für klassische aber auch informationsbedingte Verschwendung sein, was ebenso auf Makro- und Mikroebene zu berücksichtigen ist und an den entsprechenden Stellen kenntlich gemacht werden kann. Ursachen für Verluste können oftmals auf Mängel an Informationen, an Prozessen des Informationsflusses und an der Informationslogistik zurückgeführt werden (HARTLEIF ET AL. 2017, GRONAU ET AL. 2019, HOELLTHALER ET AL. 2019B).

Auf Mikroebene soll die informationsflussorientierte Beurteilung von den aufgenommenen Zusammenhängen, den einzelnen Parametern sowie den Transformationsarten und Funktionen erfolgen. Darüber hinaus dienen zusätzliche Felder unterhalb des aufgenommenen Wertstroms auf Makro- und Mikroebene für ergänzende Beschreibungen zu den identifizierten Verschwendungen. Beispielhaft sind mögliche Kennzeichnungen identifizierter Verschwendungen in Abbildung 6.5 aufgeführt. Die zusätzlich geschaffene Transparenz durch die Identifikation von Verschwendung auf Mikroebene kann genutzt werden, um nachgelagert auf Makroebene bereits identifizierte Verschwendungen weiter zu spezifizieren oder zusätzliche Verschwendungen aufzudecken.

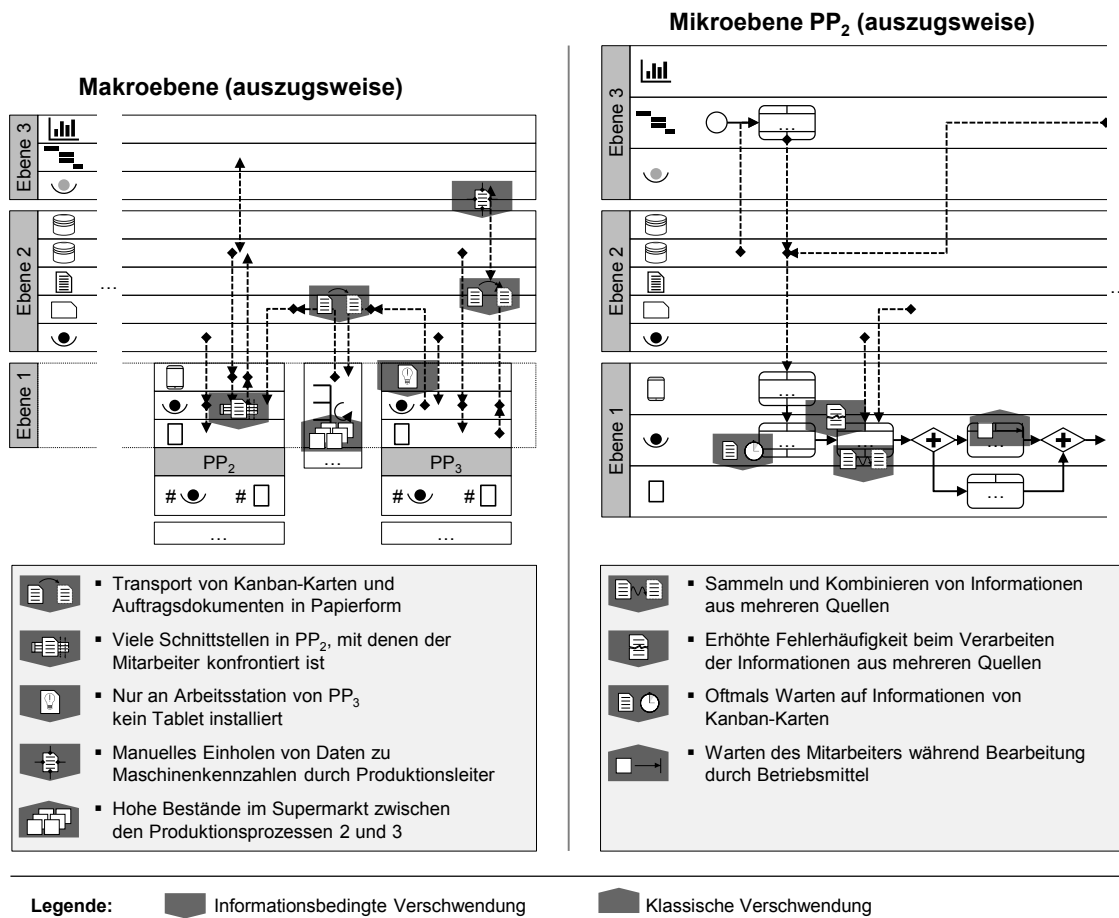


Abbildung 6.5: Beispielhafte Identifikation von Verschwendung im informationsflussorientierten Wertstrom auf Makro- und Mikroebene

Weiterführend zu den identifizierten Verschwendungen im informationsflussorientierten Wertstrom auf Makro- und Mikroebene soll im nächsten Schritt durch das Aufzeigen von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen Transparenz hinsichtlich möglicher informationsbedingter Ursachen geschaffen werden.

### 6.2.5 Ursache-Wirkungs-Analyse

Informationsbedingte Verschwendungen sind in Prozessen auftretende Verschwendungen, die sich auf den Produktionsfaktor Information zurückführen lassen. Klassische Verschwendungen können in diesem Zusammenhang informationsbedingt sein, wenn sich ihre Ursachen (U) auf den Produktionsfaktor Information zurückführen lassen. Die identifizierten Verschwendungen stellen defizitäre Abläufe oder Probleme in einem betrachteten Wertstrom dar. Um die Ursachen von Verschwendungen bezüglich des informationsflussorientierten Wertstroms zu ermitteln, wird nachfolgend eine Ursache-Wirkungs-Analyse vorgestellt, die auf der grundlegenden Struktur



des Ursache-Wirkungs-Diagramms aufbaut. Die ursprünglichen Kategorien für die Hauptäste sind Mensch, Material, Maschine, Methode und Milieu (KAMISKE & BRAUER 2011). Diese Kategorien werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu geeigneten Ursachenkategorien adaptiert. Die Hauptäste des entwickelten Ursache-Wirkungs-Diagramms beschreiben die Ursachenkategorien Mitarbeiter, Produkt, Betriebsmittel, Prozess und Informationssystem. Anschließend sind die Ursachen der im Wertstrom identifizierten informationsbedingten sowie klassischen Verschwendungen zu ermitteln, indem geeignete Kreativitätstechniken (z. B. Brainstorming, 6 W-Fragen „Was, Wann, Wo, Warum, Wer, Wie“, 5 mal „Warum“) verwendet werden. Dadurch sollen die wesentlichen Ursachen zu den identifizierten Verschwendungen ermittelt werden (KAMISKE & BRAUER 2011, HOFMANN 2020). Indem in diesem Schritt neben informationsbedingten Verschwendungen auch klassische Verschwendungen hinsichtlich ihrer Ursachen untersucht werden, können auch etwaige informationsbedingte Ursachen klassischer Verschwendungen aufgedeckt und ermittelt werden. Der Aufbau des Diagramms zur Ursache-Wirkungs-Analyse ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Zu identifizierten Ursachen kann auch eine Hierarchisierung nach Haupt- und Nebenursachen durchgeführt werden, um Ursachen detaillierter beschreiben zu können. Darüber hinaus können in Abhängigkeit des Betrachtungsfalls mehrere Verschwendungen zusammenfassend hinsichtlich ihrer Ursachen analysiert werden.

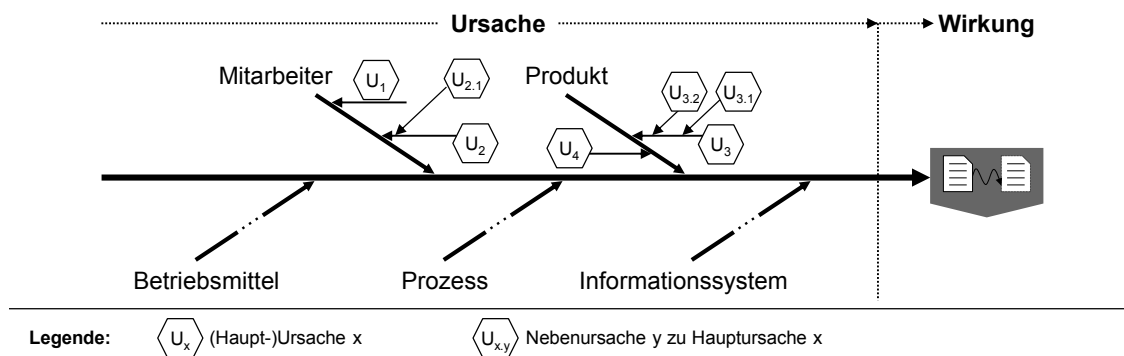


Abbildung 6.6: Ursache-Wirkungs-Diagramm

Anhaltspunkte für Treiber von Verschwendung können diejenigen Produktionsprozesse sein, die aufgrund einer vergleichsweise hohen Zykluszeit einen Engpass darstellen oder eine vergleichsweise geringe Qualität aufweisen. Bei solchen Produktionsprozessen können informationsbedingte Verschwendungen für derartige Defizite und Probleme verantwortlich sein, weshalb die vorgestellte Ursache-Wirkungs-Analyse Transparenz durch eine detaillierte Ursachenidentifikation schaffen soll.

Aufbauend auf der informationsflussorientierten Wertstromanalyse erfolgt das informationsflussorientierte Wertstromdesign, das nachstehend vorgestellt wird.

### **6.3 Informationsflussorientiertes Wertstromdesign**

#### **6.3.1 Beschreibung der Vorgehensweise**

Die Vorgehensweise des informationsflussorientierten Wertstromdesigns baut auf der informationsflussorientierten Wertstromanalyse auf und untergliedert sich in drei Schritte. Zunächst werden basierend auf den informationsbezogenen Gestaltungsansätzen spezifische Maßnahmen zur Beseitigung identifizierter Verschwendungen ermittelt. Hierbei wird die vorhergehende Ursache-Wirkungs-Analyse zu einer Ursache-Wirkungs-Maßnahmen-Analyse erweitert, um gestaltungsansatzbasierte Maßnahmen zur Verschwendungsbeseitigung zu generieren (Abschnitt 6.3.2). In einem weiteren Schritt wird aufbauend auf einer Priorisierung der Maßnahmen ein verschwendungsarmer Soll-Wertstrom entwickelt (Abschnitt 6.3.3). Im dritten Schritt erfolgt die Ermittlung der prozessualen Integration von digitalen Technologien. Hierbei werden deren Fähigkeiten in Bezug auf Transformationsarten, Funktionen und Gestaltungsansätze skizziert und prozessspezifische Anforderungen ermittelt. Anschließend wird der Einfluss einer veränderten Einbindung von Informationsflussteilnehmern bzw. von digitalen Technologien auf die Parameter abgeschätzt, die durch die Maßnahmen adressiert werden können (Abschnitt 6.3.4).

#### **6.3.2 Generierung gestaltungsansatzbasierter Maßnahmen**

Werden die identifizierten Verschwendungen bzw. ihre informationsbedingten Ursachen behoben, so sind positive Effekte auf den betrachteten Wertstrom zu erwarten. Um Maßnahmen (M) zu ermitteln, wie die identifizierten Verschwendungen behoben werden können, sollen in einem nächsten Schritt die in Abschnitt 5.3.4 beschriebenen informationsbezogenen Gestaltungsansätze verwendet werden.

Durch die Ursache-Wirkungs-Analyse wurde Transparenz bezüglich defizitärer Abläufe und Probleme im betrachteten Wertstrom geschaffen, die in Zusammenhang mit informationsbedingten aber auch klassischen Verschwendungen und ihren Ursachen stehen. Um zur Behebung von Verschwendung bzw. ihren informationsbedingten Ursachen geeignete Maßnahmen zu ermitteln und abzuleiten, wird das Ursache-Wirkungs-Diagramm zu einem Ursache-Wirkungs-Maßnahmen-Diagramm erweitert. Hierfür wird das Ursache-Wirkungs-Diagramm um eine lösungsbezogene Dimension

ergänzt, dessen Hauptäste die informationsbezogenen Gestaltungsansätze darstellen (vgl. Abschnitt 5.3.4). Diese Hauptäste sollen zur Beseitigung von Verschwendungen, die selbst informationsbedingt oder deren Ursachen informationsbedingt sind, um gestaltungsansatzbasierte Maßnahmen angereichert werden, indem geeignete Kreativitätstechniken zur Generierung von Maßnahmen angewendet werden (vgl. Abschnitt 6.2.5). Restriktionen sollen direkt berücksichtigt werden, um eine Dokumentation nicht realisierbarer Maßnahmen zu vermeiden und deren weitere und nicht zielführende Betrachtung präventiv zu unterbinden. Abbildung 6.7 visualisiert die grundlegende Struktur des Ursache-Wirkungs-Maßnahmen-Diagramms, das zur Generierung gestaltungsansatzbasierter Maßnahmen Verwendung finden soll. Durch die generierten Maßnahmen sollen identifizierte Verschwendungen und ihre Ursachen beseitigt werden können. Vergleichbar wie bei der Ursachenidentifikation kann auch bei der Maßnahmenidentifikation mit einer Hierarchisierung gearbeitet werden, um unterschiedliche Detailgrade der Maßnahmen zu beschreiben.

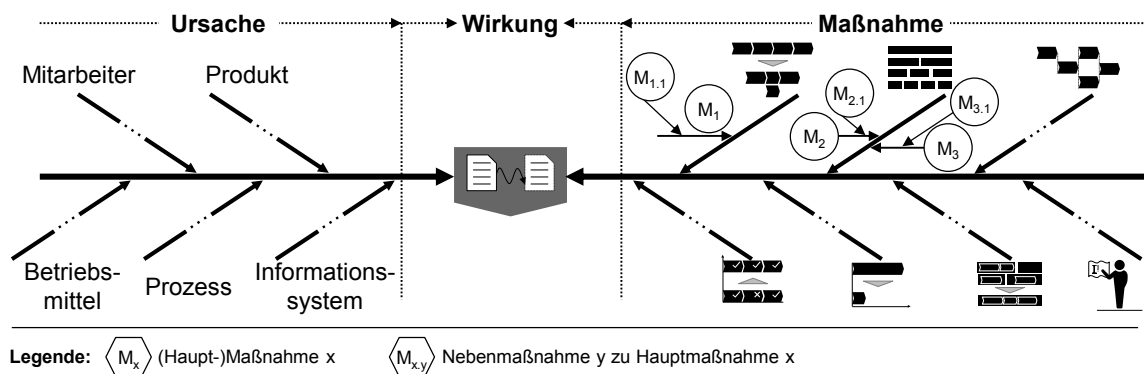


Abbildung 6.7: Ursache-Wirkungs-Maßnahmen-Diagramm

Sind die Maßnahmen ermittelt, die zur Behebung der Ursachen identifizierter Verschwendungen beitragen, so können diese hinsichtlich des zu erwartenden Nutzens und des zu erbringenden Aufwands bewertet werden. Die generierten Maßnahmen werden deshalb im nächsten Schritt einer Aufwand-Nutzen-Bewertung unterzogen, um eine Priorisierung abzuleiten, die bei der Entwicklung des Soll-Wertstroms einfließen kann. Nutzen durch ergriffene Maßnahmen entsteht, wenn sie durch die Behebung von Verschwendungen zu Verbesserungen des Wertstroms beitragen. Je gravierender die Verschwendungen sind, die durch die jeweilige Maßnahme behoben werden, desto höher ist der zu erwartende Nutzen. Aufwand beschreibt demgegenüber das Maß an erforderlichen Ressourcen für die Umsetzung der Maßnahmen. Eine Priorisierung nach Nutzen und Aufwand orientiert sich an der Einordnung der gene-

rierten Maßnahmen in die Kategorien vorteilhaft, ausgewogen und inadäquat (vgl. Abbildung 6.8). Vorteilhafte Maßnahmen sind ausgewogenen und ausgewogene Maßnahmen inadäquaten vorzuziehen. Hierbei sollte im Sinne der Wirtschaftlichkeit bei der Generierung von Maßnahmen berücksichtigt werden, ob zunächst verschlankende Maßnahmen digitalisierenden Maßnahmen vorzuziehen sind (METTERNICH ET AL. 2017, HARTMANN ET AL. 2018A). In diesem Zusammenhang sollte geprüft werden, ob sich beispielsweise durch eine Verschlinkung informationsbezogener Prozesse bereits vergleichbare Effekte wie durch eine kostenintensive Investition in eine digitale Technologie erzielen lassen. Basierend auf den ermittelten und priorisierten Maßnahmen zur Behebung von Verschwendungen und ihren Ursachen wird in einem weiteren Schritt ein Soll-Wertstrom aufgebaut.

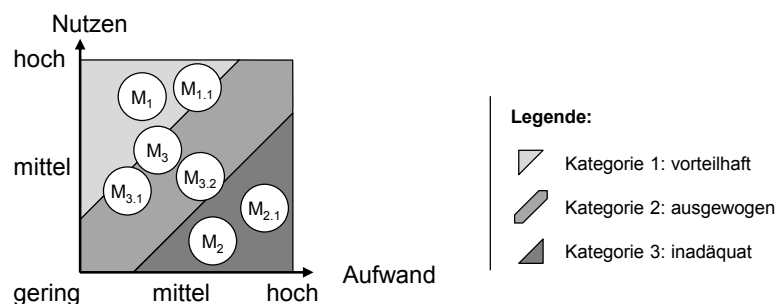


Abbildung 6.8: Aufwand-Nutzen-Bewertung gestaltungsansatzbasierter Maßnahmen

### 6.3.3 Entwicklung eines verschwendungsarmen Soll-Wertstroms

Aufbauend auf den generierten und priorisierten gestaltungsansatzbasierten Maßnahmen wird in einem weiteren Schritt der Soll-Wertstrom des informationsflussorientierten Wertstroms entwickelt. Es sind insbesondere die informationsbedingten Verschwendungen und deren Ursachen zu fokussieren, zu deren Behebung geeignete Maßnahmen im Ursache-Wirkungs-Maßnahmen-Diagramm identifiziert wurden und deren Aufwand-Nutzen-Bewertung auf eine hohe Einflussstärke und Beeinflussbarkeit schließen lässt. Hierbei müssen einzelne Maßnahmen nicht immer zwingend zur Behebung einzelner Verschwendungen bzw. Ursachen beitragen. Fallabhängig können einzelne oder mehrere miteinander kombinierte Maßnahmen zur Behebung einzelner oder mehrerer informationsbedingter Verschwendungen bzw. Ursachen beitragen. Bei der Ermittlung von möglichen Integrationen sollte jedoch darauf geachtet werden, dass dieselben Maßnahmen nicht mehrmals in den Integrationen verwendet werden. Da die in der Ursachen- und Maßnahmenidentifikation angewendeten Kreativitätsmethoden in der Regel einen großen Betrachtungsraum aufspannen, müssen

beim Aufbau eines Soll-Wertstroms weder alle Verschwendungen noch alle Maßnahmen zwingend berücksichtigt werden. Ziel beim Aufbau eines Soll-Wertstroms ist es vielmehr, auf Grundlage der Transparenz bezüglich informationsbedingter und klassischer Verschwendung, informationsbedingter Ursachen sowie ermittelter Maßnahmen einen verschwendungsarmen und konsistenten Soll-Wertstrom zu entwickeln und aufzubauen. Beim Aufbau des umgestalteten Wertstroms sollen bereits Abschätzungen bezüglich einzelner Prozessparameter getroffen werden. Beispielsweise sollen Bearbeitungs- oder Prozesszeiten sowie reduzierte Zeit- und Qualitätsverluste von Produktionsprozessen abgeschätzt werden, die aus der Verkürzung oder dem Entfall von Prozessen des Informationsflusses resultieren. Es sollte zunächst der Soll-Wertstrom auf Mikroebene erstellt werden, da hierdurch detailliert Transparenz zu den Abläufen geschaffen wird, bevor darauf aufbauend der übergeordnete Soll-Wertstrom auf Makroebene gestaltet wird. In Fortführung des bisherigen beispielhaft aufgezeigten informationsflussorientierten Wertstroms aus Abschnitt 6.2 ist dessen Soll-Wertstrom in Abbildung 6.9 im Vergleich zum Ist-Wertstrom von Abbildung 6.5 auszugsweise dargestellt. Hierbei wird zur Veranschaulichung beispielhaft skizziert, wie die Verschwendungen durch die generierten gestaltungsansatzbasierten Maßnahmen behoben werden können.

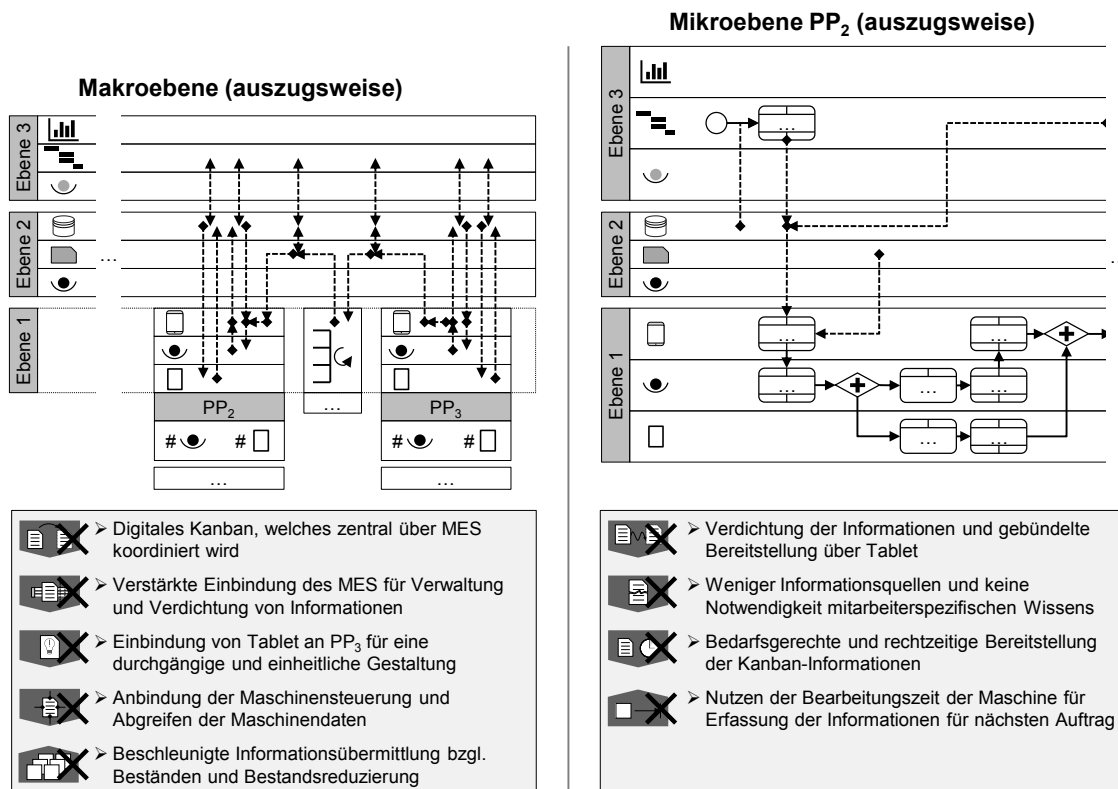


Abbildung 6.9: Beispielhafter informationsflussorientierter Soll-Wertstrom

Dieser entwickelte Soll-Wertstrom stellt ein Zielbild des zukünftigen Wertstroms dar, zu dessen Umsetzung es der Realisierung der ermittelten Maßnahmen bedarf. Um entsprechende Maßnahmen realisieren zu können, können fallspezifisch vorhandene Informationsflussteilnehmer des bestehenden Informationssystems, beispielsweise in Form von digitalen Technologien, bereits ausreichend sein, indem ihre Integration angepasst wird (z. B. Erweiterung der bereitgestellten Informationen über vorhandene Tablets). Demgegenüber können aber auch weitere noch nicht verwendete Informationsflussteilnehmer bzw. digitale Technologien und deren Integration notwendig sein, um Maßnahmen zu realisieren (z. B. digitales Kanban). Damit der Beitrag von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien zu den veränderten Prozessen des Wertstroms ersichtlich wird, ist deren Einfluss auf prozessualer Ebene in einem weiteren Schritt zu ermitteln und zu beurteilen.

### 6.3.4 Ermittlung der prozessualen Integration digitaler Technologien

Zwischen dem aufgenommenen Ist-Wertstrom und dem aufgebauten Soll-Wertstrom auf Makro- und Mikroebene bestehen Unterschiede bezüglich der Abläufe und Prozesse, was sich in Unterschieden der Struktur (z. B. veränderte Prozessreihenfolge) oder anderen Parameterwerten von Bestandteilen der Produktionsprozesskette widerspiegelt (z. B. kürzere Bearbeitungszeit, weniger Zeit für technische Störungen, höherer Qualitätsgrad). Die Maßnahmen, die derartige positive Effekte durch die Beseitigung von informationsbedingter Verschwendung hervorrufen können, lassen sich auf unterschiedlichen Wegen realisieren. Auf der einen Seite kann zu einer Realisierung der Maßnahmen die bestehende Art und Weise der Integration bereits vorhandener Informationsflussteilnehmer bzw. digitaler Technologien im Informationssystem verändert werden, was einer Integrationsanpassung entspricht. Auf der anderen Seite kann die Integration bisher nicht vorhandener Informationsflussteilnehmer bzw. digitaler Technologien im Informationssystem betrachtet werden, um die Realisierung der Maßnahmen zu unterstützen, was einer Integrationsneuerung<sup>13</sup> entspricht. Beide Arten der Integration beruhen auf den aus den Gestaltungsansätzen abgeleiteten Maßnahmen. Hierbei kann eine Integration eine oder mehrere Maßnahmen adressieren, was in Abbildung 6.10 schematisch dargestellt ist. In diesem Zusammenhang stellen sowohl bestehende als auch zukünftige Informationsflussteilnehmer bzw. digitale Technologien Werkzeuge dar, die mit ihren Fähigkeiten zur Realisierung des

---

<sup>13</sup> Da bei Integrationsneuerungen in der Regel auch Anpassungen an der Integration von Informationsflussteilnehmern des bestehenden Informationssystems erforderlich sind, stehen Integrationsneuerungen oftmals in Verbindung mit Integrationsanpassungen.



Lassen sich einer digitalen Technologie grundlegende Fähigkeiten allgemein zuordnen, so können prozessspezifische Anforderungen dennoch dazu führen, dass diese Anforderungen durch die grundlegenden Fähigkeiten digitaler Technologien nicht bedient werden können. Anschließend an die Ermittlung der grundlegenden Fähigkeiten ist folglich abzugleichen, inwiefern die jeweiligen Fähigkeiten der zu integrierenden digitalen Technologie die prozessspezifischen Anforderungen erfüllen. Beispielsweise eignen sich Tablets entsprechend ihren grundlegenden Fähigkeiten für das Erfassen von Informationen durch Displayberührungen. Jedoch können Mitarbeiter eines spezifischen Prozesses, die durchgehend Sicherheitshandschuhe tragen müssen, nicht von dieser Funktion der Informationserfassung profitieren. Ist es nicht möglich, alle Anforderungen von Prozessen durch eine digitale Technologie zu adressieren, so ist dies entsprechend im weiteren Verlauf der Vorgehensweise zu berücksichtigen. Alternativ sind weitere digitale Technologien oder Informationsflussteilnehmer zu betrachten, die zusätzlich integriert werden müssen oder deren Integration anzupassen ist, um notwendige prozessspezifische Anforderungen adressieren zu können. Abschließend ist der Einfluss einer digitalen Technologie hinsichtlich prozessualer Veränderungen zu beurteilen. Diese Schritte zur prozessualen Integration digitaler Technologien sind schematisch in Abbildung 6.12 am Beispiel der Dimension Zeit dargestellt. Vergleichbar zu dem in Abbildung 6.12 aufgeführten Beispiel bezüglich der Dimension Zeit verhält es sich bei der Dimension Qualität. Derartige Abschätzungen zu betrachteten digitalen Technologien können insbesondere durch Prozessverantwortliche oder entsprechende Experten durchgeführt werden.

Das aufgeführte Vorgehen fokussiert insbesondere bisher nicht im Informationssystem integrierte digitale Technologien. Um die prozessuale Integration neuer digitaler Technologien abbilden zu können, sind gegebenenfalls Anpassungen und Ergänzungen am Soll-Wertstrom vorzunehmen, indem beispielsweise zusätzliche Lanes für die jeweilige digitale Technologie ergänzt werden. Dieses Vorgehen kann allerdings auch allgemein für Integrationsneuerungen durch bisher nicht integrierte Informationsflussteilnehmer ebenso wie für bereits integrierte Informationsflussteilnehmer und digitale Technologien im Rahmen einer Integrationsanpassung verwendet werden. In der Regel sind die Freiheitsgrade hinsichtlich Anpassungen bei bereits integrierten Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien geringer, jedoch können für gewöhnlich aufgrund des Erfahrungsschatzes bessere Abschätzungen bezüglich Anpassungen an bereits integrierten Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien getroffen werden.



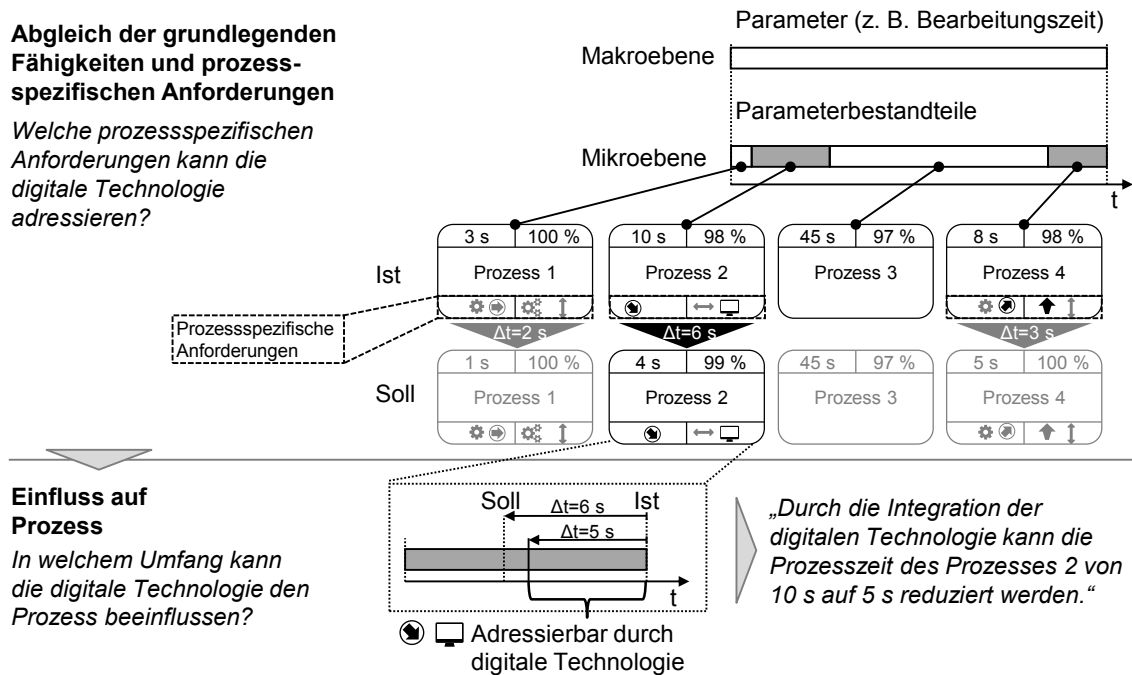


Abbildung 6.12: Ermittlung prozessspezifischer Anforderungen und des Einflusses auf Parameter

Dieses Vorgehen zur Ermittlung der prozessualen Integration digitaler Technologien ist entsprechend den relevanten Prozessen des aufgenommenen Wertstroms, den generierten Maßnahmen sowie dem aufgebauten Soll-Wertstrom durchzuführen, um identifizierte Verschwendung zu beseitigen. In der Regel ist die Umsetzung mehrerer Maßnahmen erforderlich, um eine im informationsflussorientierten Wertstrom identifizierte Verschwendung umfassend zu beseitigen und so dem Zustand des hergeleiteten Soll-Wertstroms näher kommen zu können. Da einzelne Informationsflussteilnehmer bzw. digitale Technologien die für eine Vielzahl entwickelter Maßnahmen erforderlichen Änderungen nicht umfänglich abbilden können, sind die vorstehend beschriebenen Schritte iterativ durchzuführen. Dies bedeutet, dass mehrere Beschreibungen prozessualer Integration von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien entstehen können, die zur Umsetzung der Maßnahmen beitragen.

Durch derartige Beschreibungen von Integrationen zu unterschiedlichen Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien werden ihre jeweiligen Einflüsse und Effekte auf prozessualer Ebene transparent dargelegt, jedoch weitestgehend isoliert und unabhängig voneinander betrachtet. Um die aus der Kombination mehrerer Integrationen resultierenden Auswirkungen auf die Zielgrößen des Wertstroms eines Ganzheitlichen Produktionssystems realitätsnah nachbilden zu können, ist der abgebildete Wertstrom über diese statische Betrachtung hinaus hinsichtlich komplexer

und dynamischer Wirkzusammenhänge zu untersuchen. Deshalb sollen derartige Wirkzusammenhänge, die durch das Zusammenspiel mehrerer Integrationen in Form von Integrationsneuerungen und Integrationsanpassungen entlang der Produktionsprozesskette resultieren können, berücksichtigt werden. Hierfür soll nachfolgend das in Abschnitt 5.4 vorgestellte System-Dynamics-Modell verwendet werden. Hierdurch wird über die Ermittlung mehrerer unabhängiger Integrationen hinaus eine gesamtheitliche Bewertung der Integration digitaler Technologien ermöglicht.

### **6.4 Bewertung der Integration digitaler Technologien**

#### **6.4.1 Beschreibung der Vorgehensweise**

Die Vorgehensweise zur Bewertung der Integration digitaler Technologien, die sich in vier Schritte untergliedert, setzt auf den Vorarbeiten der informationsflussorientierten Wertstromanalyse sowie den Vorarbeiten des informationsflussorientierten Wertstromdesigns auf. Um zunächst den aufgenommenen Wertstrom simulativ abzubilden, wird ein Referenzmodell erstellt und dessen Aussagekraft beurteilt (Abschnitt 6.4.2). In einem weiteren Schritt werden basierend auf den priorisierten Maßnahmen Integrationsszenarien ermittelt (Abschnitt 6.4.3), deren Auswirkungen auf die Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme anschließend auf Grundlage des Referenzmodells prognostiziert werden (Abschnitt 6.4.4). Abschließend werden die Integrationsszenarien untereinander und in Bezug auf das Referenzmodell verglichen, um Entscheidungen für die Realisierung von Integrationsszenarien zu unterstützen (Abschnitt 6.4.5).

#### **6.4.2 Erstellung eines Referenzmodells zum Wertstrom**

Bei der Aufnahme des informationsflussorientierten Wertstroms wurden die Parameter einer ausgewählten Produktionsprozesskette sowie die zugehörigen Werte zu den Zielgrößen ermittelt. Dieser Wertstrom stellt den aktuellen Status quo der Produktionsprozesskette, der Prozesse des Informationsflusses sowie der statischen Zusammenhänge dar. Auf dieser Grundlage wird in einem nächsten Schritt das System-Dynamics-Modell eingesetzt.

Ausgehend von dem aufgenommenen informationsflussorientierten Wertstrom ist die zugehörige Produktionsprozesskette mit den entsprechenden Zusammenhängen zwischen den Produktionsprozessen und den Puffergrößen in dem System-Dynamics-

Modell abzubilden. Hierfür werden die entwickelten Agenten verwendet, die generische Beschreibungen der Bestandteile der Produktionsprozesskette darstellen. In einem weiteren Schritt sind die im Wertstrom auf Makroebene erfassten Werte in dem Modell zu parametrieren, um die prozessspezifischen Eigenschaften darzustellen und das Verhalten der Produktionsprozesskette simulieren zu können. Die Werte hinsichtlich der Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme (GPS-Zielgrößen) Durchlaufzeit, Qualitätsgrad, Produktivitätsgrad und Every Part Every Interval werden hierbei nicht parametrieren. Sie dienen in einem weiteren Schritt nämlich dazu, dass die simulativ ermittelten Werte der GPS-Zielgrößen einer Produktionsprozesskette mit den im Rahmen der Wertstromaufnahme tatsächlich erfassten Werten abgeglichen werden. Hierbei werden diese Werte in der Simulation durch das Aggregieren von Simulationsergebnissen berechnet. Durch diesen Abgleich kann die Genauigkeit und folglich die Aussagekraft des Simulationsmodells bewertet werden, indem die prozentualen Abweichungen zwischen den entsprechenden Werten berechnet und die Abweichungen bewertet werden (vgl. Abbildung 6.13).

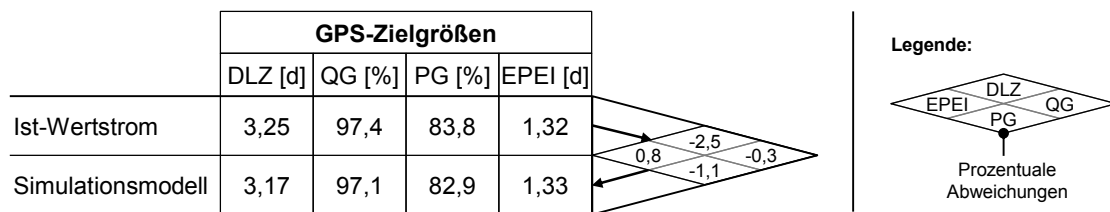


Abbildung 6.13: Beispielhafter Vergleich von Werten zu GPS-Zielgrößen zwischen Ist-Wertstrom und Simulationsmodell

Die prozentualen Abweichungen zwischen den einzelnen GPS-Zielgrößen werden nach Formel (6.5) ermittelt, welche die Berechnung beispielhaft anhand der Durchlaufzeit beschreibt.

$$\text{Prozentuale Abweichung}_{\text{DLZ}} = \frac{\text{DLZ}_{\text{Simulationsmodell}} - \text{DLZ}_{\text{Ist-Wertstrom}}}{\text{DLZ}_{\text{Ist-Wertstrom}}} * 100 \% \quad (6.5)$$

Sind die prozentualen Abweichungen innerhalb einer vorab definierten Toleranz, so liegt ein referenziertes Simulationsmodell bzw. ein Referenzmodell zur modellierten Produktionsprozesskette und folglich zum aufgenommenen Wertstrom vor. Sind die prozentualen Abweichungen außerhalb einer akzeptierten Toleranz, so ist die Parametrierung der Produktionsprozesskette zu prüfen und entsprechende Anpassungen sind vorzunehmen, um die erforderliche Genauigkeit der Simulation zu erreichen.

Hierfür sind auch die Werte des aufgenommenen Wertstroms bei Bedarf zu überprüfen, da es sich bei der Wertstromaufnahme um eine Momentaufnahme handelt und daher einzelne Parameterwerte dieser Momentaufnahme Ursache für eine unzureichende Simulationsgenauigkeit sein können. Die entsprechenden Parameter sind zu identifizieren und ihre Werte bei Bedarf zu korrigieren. Der beschriebene Ablauf ist in Abbildung 6.14 zusammenfassend dargestellt.

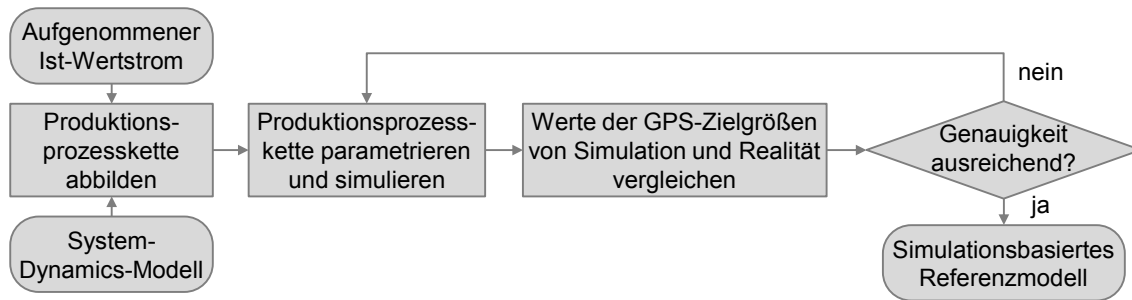


Abbildung 6.14: Schritte vom Wertstrom zum Referenzmodell

Die Werte zu den GPS-Zielgrößen, die mit dem auf System Dynamics basierenden Simulationsmodell ermittelt wurden, dienen in den folgenden Betrachtungen als Referenzwerte des simulationsbasierten Referenzmodells. Mit ihnen können die Werte der GPS-Zielgrößen von Integrationsszenarien verglichen werden. Die Ermittlung von Integrationsszenarien wird nachstehend erläutert.

### 6.4.3 Ermittlung von Integrationsszenarien

In Abschnitt 6.3.4 wurde geschildert, wie sich Integrationen von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien, die auf Grundlage der gestaltungsansatzbasierten Maßnahmen generiert wurden, und die zugehörigen Auswirkungen auf prozessualer Ebene ermitteln lassen. Da die Realisierung von Maßnahmen in der Regel mehrerer prozessualer Veränderungen in Form von Integrationsanpassungen bzw. Integrationsneuerungen bedarf, sind entsprechend mehrere aufeinander aufbauende prozessuale Veränderungen der Integration von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien vorzunehmen. Auf Grundlage der generierten Maßnahmen lassen sich in Abhängigkeit der Kombination mehrerer Integrationen unterschiedliche Integrationsszenarien ableiten. Ein Integrationsszenario ist in diesem Zusammenhang eine Aufeinanderfolge maßnahmenbasierter prozessualer Integrationen. Durch das System-Dynamics-Modell sollen etwaige neutrale, verstärkende oder abschwä-

chende Wirkzusammenhänge eines Integrationsszenarios in einem betrachteten Wertstrom aufgedeckt werden.

Um diese kausalen Zusammenhänge aufdecken zu können, sind zunächst die Integrationsszenarien zu ermitteln, welche die möglichen zu untersuchenden Kombinationen aufeinander folgender Integrationen darstellen. Das Aufstellen der Integrationsszenarien aus einer Menge von  $b$  Integrationen bei einer Integrationstiefe  $c$  ist in Abbildung 6.15 visualisiert. Die Integrationstiefe stellt hierbei die Anzahl aufeinanderfolgender Integrationen dar.

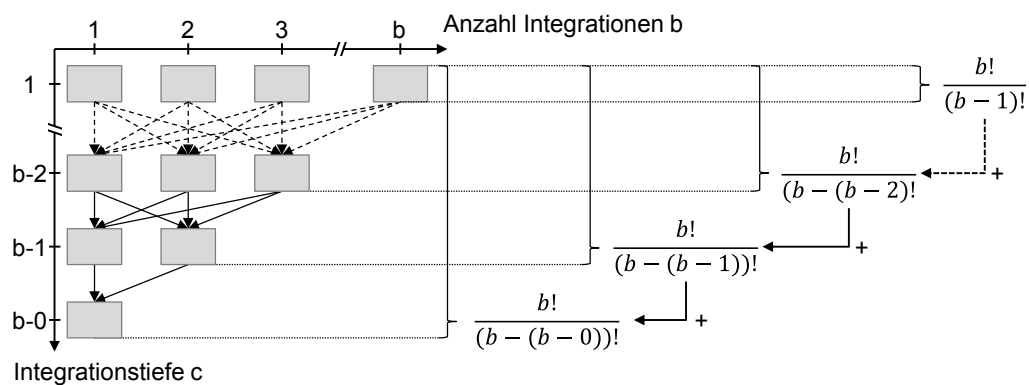


Abbildung 6.15: Schema zum Aufstellen von Integrationsszenarien

Um die Anzahl der Integrationsszenarien ( $\#IS$ ) zu erhalten, werden die einzelnen Integrationen ohne Wiederholung permutiert. Folglich lässt sich die mögliche Gesamtzahl an Integrationsszenarien bei  $b$  beschriebenen Integrationen und einer definierten Integrationstiefe  $c$  nach dem in Formel (6.6) aufgeführten mathematischen Zusammenhang ermitteln.

$$\#IS = \begin{cases} \sum_{i=1}^b \frac{b!}{(b-i)!} & , \quad \text{wenn } b = c \\ \sum_{i=1}^b \frac{b!}{(b-i)!} - \sum_{i=c+1}^b \frac{b!}{(b-i)!} & , \quad \text{wenn } b > c \end{cases} \quad (6.6)$$

Dieser ermittelte Betrachtungsraum spannt die Gesamtheit theoretisch möglicher Integrationsszenarien in Abhängigkeit der Integrationstiefe auf. In ihrer Realisierung können sich jedoch einige dieser theoretisch ermittelten Integrationsszenarien als nicht praktikabel herausstellen, da beispielsweise eine Integration die Voraussetzung für eine darauf folgende Integration schafft. Im Rahmen einer Plausibilitätsprüfung gilt es, plausible und praktikable Integrationsszenarien für weitere Untersuchungen

zu selektieren. Die Auswirkungen dieser Integrationsszenarien sollen im weiteren Verlauf hinsichtlich ihrer Auswirkungen und unter Berücksichtigung etwaiger kausaler Zusammenhänge weiter untersucht werden.

### 6.4.4 Prognose der Auswirkungen von Integrationsszenarien

In einem weiteren Schritt sollen die Auswirkungen der vorstehend ermittelten Integrationsszenarien in Bezug auf die GPS-Zielgrößen Durchlaufzeit, Qualitätsgrad, Produktivitätsgrad und Every Part Every Interval prognostiziert werden. Hierfür ist auf Grundlage des simulationsbasierten Referenzmodells, das in seiner Produktionsprozesskette die wesentlichen Eigenschaften des Ist-Wertstroms abbildet, entsprechend dem zu untersuchenden Integrationsszenario zu parametrieren. Darauf aufbauend kann das jeweilige Integrationsszenario im System-Dynamics-Modell simuliert werden, wodurch sich prognostizierte Werte zu den GPS-Zielgrößen hinsichtlich der Auswirkungen des Integrationsszenarios ermitteln lassen. Die simulationsbasiert ermittelten Werte berechnen sich entsprechend nach den Formeln (6.1) bis (6.4). Dieser Vorgang wird für jedes zu untersuchende Integrationsszenario durchgeführt, ehe in einem weiteren Schritt die Integrationsszenarien miteinander verglichen und in Bezug zum Referenzmodell sowie Ist-Wertstrom gesetzt werden können. In Abbildung 6.16 sind diese Schritte zusammenfassend dargestellt.

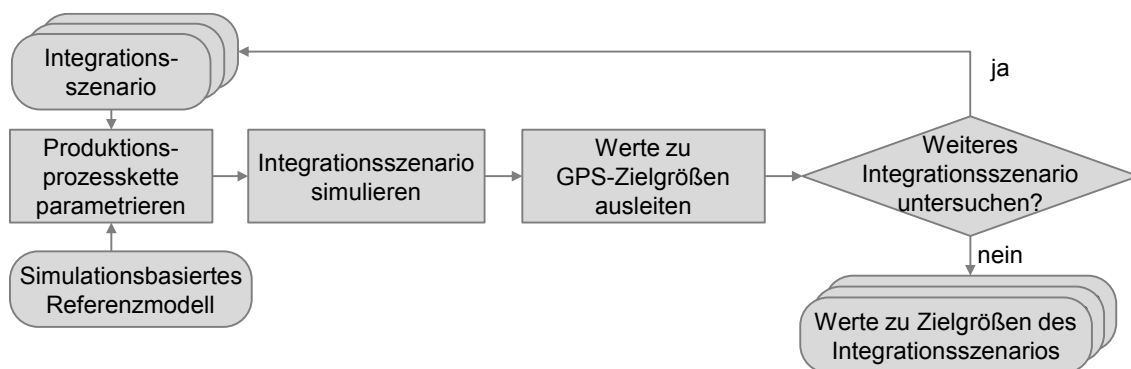


Abbildung 6.16: Schritte zur simulationsbasierten Prognose der Auswirkungen von Integrationsszenarien

Nach diesem Vorgehen werden die Integrationsszenarien zunächst voneinander losgelöst betrachtet. In einem auf den prognostizierten Werten aufbauenden Vergleich der Integrationsszenarien sollen nachfolgend kausale Zusammenhänge der den Integrationsszenarien zugehörigen Maßnahmen aufgedeckt werden.

### 6.4.5 Vergleich von Integrationsszenarien

Die zu untersuchenden Integrationsszenarien können sich sowohl durch die Maßnahmen, die sie abbilden, als auch durch die Reihenfolge, wie die Maßnahmen aufeinander aufbauen und realisiert werden sollen, unterscheiden. Abbildung 6.17 stellt diese Unterschiede in einem vereinfachten Beispiel dar.

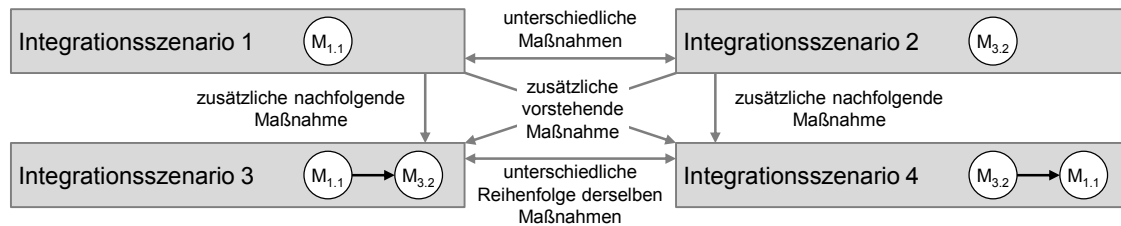


Abbildung 6.17: Unterschiede vergleichbarer Integrationsszenarien

Da die Elemente der zu untersuchenden Produktionsprozesskette ein dynamisches System bilden, können sich auf den ersten Blick ähnlich wirkende Integrationsszenarien aufgrund verstärkender oder abschwächender Wirkzusammenhänge bezüglich ihrer Auswirkungen auf die GPS-Zielgrößen unterscheiden. Die beiden Integrationsszenarien 3 und 4 des in Abbildung 6.17 aufgeführten Beispiels müssen folglich nicht zwangsläufig zu denselben Auswirkungen im betrachteten Wertstrom führen, obwohl sie dieselben Maßnahmen in sich abbilden. Auch wäre ein einfaches Aufsummieren der Ergebnisse der Integrationsszenarien 1 und 2 nicht geeignet, um Rückschlüsse auf die Integrationsszenarien 3 oder 4 zu ziehen.

Ein nachfolgender Vergleich der prognostizierten Werte der GPS-Zielgrößen betrachteter Integrationsszenarien soll neben einem einfachen Vergleich der Integrationsszenarien etwaige verstärkende oder abschwächende Wirkzusammenhänge aufdecken, indem auch Unterschiede ähnlich wirkender bzw. vergleichbarer Integrationsszenarien aufgezeigt werden. Abbildung 6.18 erweitert die zugrunde liegende Struktur von Abbildung 6.13 aus Abschnitt 6.4.2, um Abweichungen zwischen den Werten zu den GPS-Zielgrößen der Integrationsszenarien zum Referenzmodell sowie Abweichungen zwischen den Integrationsszenarien selbst aufzuzeigen. Dadurch sollen die Bewertung von und die nachgelagerte Auswahl zwischen mehreren Handlungsalternativen bzw. Integrationsszenarien präskriptiv unterstützt werden und rational erfolgen können (EISENFÜHR & WEBER 2003, LAUX ET AL. 2014). Die Berechnung der Abweichungen erfolgt nach dem Schema von Formel (6.5).

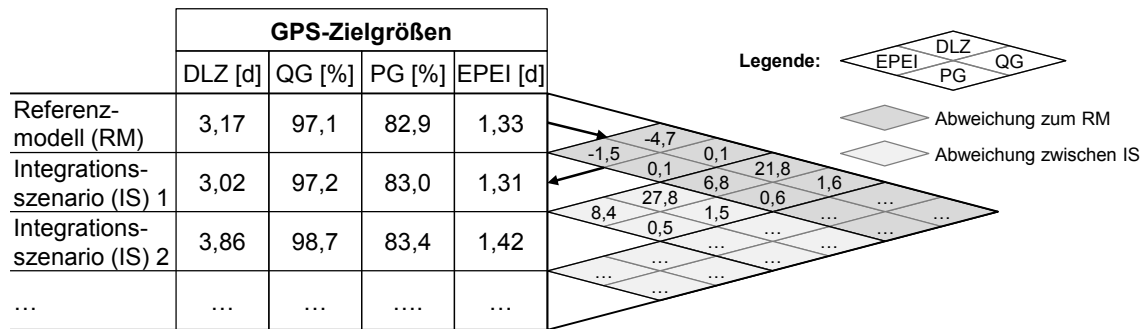


Abbildung 6.18: Beispielhafter Vergleich von Werten zu GPS-Zielgrößen zwischen Referenzmodell und Integrationsszenarien

Diese Beschreibung bezieht sich auf die Ebene der gesamten Produktionsprozesskette des betrachteten Wertstroms, jedoch können bei Bedarf auch detaillierte Betrachtungen auf Ebene von Produktionsprozessen und zugehörigen Werten oder weiteren Produktionsprozesskettenbestandteilen erfolgen. Beispielsweise lassen sich Auswirkungen auf die Zielgrößen oder Ausbringungsmenge einzelner Produktionsprozesse oder auf die Entwicklung von Pufferbeständen ermitteln. Insbesondere durch den Vergleich ähnlicher Integrationsszenarien (z. B. Integrationsszenarien mit unterschiedlichen Reihenfolgen derselben Maßnahmen) lassen sich aus den Abweichungen Rückschlüsse auf verstärkende oder abschwächende Wirkzusammenhänge ziehen.

Die prognostizierten Werte im Vergleich zum Ausgangszustand des Ist-Wertstroms sollen als Entscheidungsgrundlage herangezogen werden, um entwickelte Maßnahmen und die zugehörigen Integrationen von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien in die Umsetzung zu bringen. In diesem Zusammenhang sind die Aufwände für die Umsetzung der ausgewählten Maßnahmen mit zu berücksichtigen.

### 6.5 Fazit

In dem vorliegenden Kapitel wurde die Vorgehensweise zur Integration digitaler Technologien entwickelt und beschrieben, die sich aus den aufeinander aufbauenden Schritten der informationsflussorientierten Wertstromanalyse, des informationsflussorientierten Wertstromdesigns und der Bewertung der Integration digitaler Technologien zusammensetzt. Die informationsflussorientierte Wertstromanalyse nimmt hierfür den Wertstrom zu einer ausgewählten Produktfamilie und der zugehörigen Produktionsprozesskette auf Makro- und Mikroebene auf Basis der definierten Formalisierung auf. Anschließend kann der Wertstrom auf Makro- und Mikroebene hinsichtlich Verschwendung analysiert werden, indem die informationsbedingten und



klassischen Verschwendungsarten Berücksichtigung finden. Darauf aufbauend unterstützt die Ursache-Wirkungs-Analyse die Ermittlung der Ursachen informationsbedingter sowie klassischer Verschwendung, wenn deren Ursachen auf den Produktionsfaktor Information zurückzuführen sind. Anschließend werden im informationsflussorientierten Wertstromdesign Maßnahmen zur Verbesserung des betrachteten Wertstroms ermittelt sowie priorisiert. Hierbei werden die Vorarbeiten zum aufgenommenen Wertstrom, den identifizierten Verschwendungen und ihren Ursachen in einem Ursache-Wirkungs-Maßnahmen-Diagramm aufgegriffen, um basierend auf den informationsbezogenen Gestaltungsansätzen zielgerichtete Maßnahmen zur Behebung der identifizierten Verschwendungen bzw. ihrer Ursachen zu generieren. Darüber hinaus erfolgt im informationsflussorientierten Wertstromdesign, basierend auf den priorisierten Maßnahmen, der Aufbau eines Soll-Wertstroms, auf dessen Grundlage die prozessuale Integration von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien in Form von Integrationsanpassungen bzw. Integrationsneuerungen ermittelt werden kann. Abschließend wird die Integration digitaler Technologien bewertet, indem zunächst ein Referenzmodell auf Basis des entwickelten System-Dynamics-Modells erstellt wird, das den Ist-Wertstrom in einem experimentierfähigen Simulationsmodell abbildet. Hierbei können anhand des Referenzmodells Prognosen zu ermittelten Integrationsszenarien, die ausgewählte Maßnahmen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen, Reihenfolgen und Integrationstiefen repräsentieren, erstellt werden. In diesem Rahmen werden die Auswirkungen der Integration digitaler Technologien auf die GPS-Zielgrößen des Wertstroms sowie etwaige verstärkende oder abschwächende Auswirkungen von Maßnahmenkombinationen identifiziert. Auf Grundlage dieser Vorgehensweise lassen sich Entscheidungen hinsichtlich der Art und Weise, ob und wie digitale Technologien integriert werden sollen, entsprechend unterstützen.



## 7 Anwendung

### 7.1 Überblick

Das Ziel des Kapitels 7 ist es, die entwickelte Methodik zu erproben und ihre Anwendung anhand eines Anwendungsbeispiels zu demonstrieren. Zunächst wird hierfür in Abschnitt 7.2 das Anwendungsbeispiel beschrieben. Darauf folgt in Abschnitt 7.3 die Anwendung der entwickelten Methodik, die sich an der Struktur der in Kapitel 6 beschriebenen Vorgehensweise orientiert. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Fazit in Abschnitt 7.4.

### 7.2 Anwendungsbeispiel

Im Folgenden wird das Anwendungsbeispiel<sup>14</sup> hinsichtlich des betrachteten Produktionssystems, des herzustellenden Produkts, der Produktionsprozesskette des Wertstroms sowie hinsichtlich des zu untersuchenden Informationssystems mit seinen Informationsflussteilnehmern und digitalen Technologien beschrieben.

#### 7.2.1 Produktionssystem, Produkt und Produktionsprozesskette

Dem Anwendungsbeispiel liegt als Produktionssystem eine wertstromorientierte Fließproduktion von kundenspezifisch herzustellenden Produkten zugrunde. Bei den Produkten handelt es sich um Wasserzähler, deren jeweilige Produktvarianten von den Kunden bei Auftragserteilung konfiguriert werden. In diesem Produktionssystem erfolgen unterschiedliche Fertigungs-, Montage- und Prüfvorgänge, das Desinfizieren sowie das Verpacken der Produkte. In dem teilautomatisierten Produktionssystem werden die modular gestalteten Wasserzähler zunächst kundenunspezifisch auf Basis von Nachfrageprognosen bis zum Entkopplungspunkt hergestellt, ehe kundenspezifische Produktmerkmale realisiert werden. Die Wasserzähler durchlaufen bei ihrer Herstellung eine Produktionsprozesskette mit neun in Reihe geschalteten Produktionsprozessen. Diese sind durch zwischengeschaltete Puffer voneinander entkoppelt, damit auftretende Produktivitätsschwankungen über Pufferbestände ausgeglichen werden können. Der letzte Produktionsprozess ist hierbei am Bedarf des nachstehenden Kundenprozesses ausgerichtet. Im Anwendungsbeispiel ist der Versand der nachstehende Kundenprozess, der außerhalb der Systemgrenze des Wertstroms mit der

---

<sup>14</sup> Aus Gründen der Geheimhaltung wurden unternehmensspezifische, sensitive Daten und Informationen adaptiert bzw. skaliert, ohne dadurch die Anwendung und Bewertung der Methodik einzuschränken.

aufgeführten Produktionsprozesskette liegt. Die Produktionsprozesse sind entsprechend am Bedarf ihres jeweils nachgelagerten Produktionsprozesses gemäß dem Pull-Prinzip ausgerichtet.

Das Produktionssystem und die Organisation der Produktionsprozesskette zur Herstellung der Wasserzähler erfüllen die wesentlichen Merkmale Ganzheitlicher Produktionssysteme (vgl. Abschnitt 2.2.2) und sind an ihren Zielgrößen ausgerichtet (vgl. Abschnitt 2.2.3). Zum Zeitpunkt der Untersuchungen befindet sich das Produktionssystem in der Ausweitung der Produktionskapazität, um die erwartete ansteigende Kundennachfrage bedienen zu können.

### 7.2.2 Betrachtetes Informationssystem

Das Informationssystem des betrachteten Produktionssystems sowie die hierin enthaltenen Informationsflussteilnehmer und digitalen Technologien lassen sich nach den Ausführungen von Abschnitt 5.2.2 klassifizieren. Bereits digitalisierte Informationsflussteilnehmer sind über entsprechende Informations- und Kommunikationstechnik (u. a. Ethernet und WLAN) kontinuierlich miteinander verbunden, wodurch das bidirektionale Übermitteln von Daten und Informationen ermöglicht ist.

Auf der Ebene Führung und Leitung (Ebene 3) liegen ein ERP-System und ein Produktionsleitsystem (PLS) vor, denen auf der Ebene der Daten- und Informationsträger (Ebene 2) zwei Datenbanken zugehörig sind. Auf der Ebene Ausführung (Ebene 1) lassen sich produktionsprozessspezifische Benutzungsschnittstellen<sup>15</sup>, Betriebsmittel und Produkte als digitale Technologien benennen, die von den Mitarbeitern bedient und gehandhabt werden. Die Benutzungsschnittstellen liegen an vereinzelt Arbeitsstationen beispielsweise als Desktoprechner mit Touchbildschirmen vor. Sie ermöglichen hierbei das Bereitstellen und Rückmelden von Auftragsinformationen sowie das Bedienen und Eingreifen in Prozesse von Betriebsmitteln. Die an das Produktionsleitsystem unmittelbar angebotenen Betriebsmittel können in diesem Zusammenhang Steuerungsvorgaben umsetzen und Rückmeldung zu Prozessfortschritten geben, ohne dass Mitarbeiter in die Abläufe eingreifen müssen. Diese Informationen können den Mitarbeitern jedoch über die Benutzungsschnittstellen bereitgestellt werden. Auch sind die Produkte selbst als digitale Technologie in die Ebene der Daten- und Informationsträger einzuordnen, da die Wasserzählerplatinen Informationen

---

<sup>15</sup> Eine Benutzungsschnittstelle umfasst „alle Bestandteile eines interaktiven Systems, die Informationen und Steuerelemente zur Verfügung stellen, die für den Benutzer notwendig sind, um bestimmte Arbeitsvorgänge mit dem interaktiven System zu erledigen“ (DIN EN ISO 9241-110).

zu ihrer Bearbeitung innehaben. Diese Informationen können an entsprechenden Betriebsmitteln via Infrarottechnologie ausgelesen werden. Neben den aufgeführten Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien werden in der Betrachtung auch die weiteren Informationsflussteilnehmer Produktionsleiter, Auftragspapiere, Bestandspapiere und implizites Mitarbeiterwissen eingebunden.

### 7.3 Anwendung der entwickelten Methodik

Die Anwendung der Methodik erfolgte nach den Schritten der entwickelten Vorgehensweise von Kapitel 6. In diesem Rahmen wurden die informationsflussorientierte Wertstromanalyse (Abschnitt 7.3.1), das informationsflussorientierte Wertstromdesign (Abschnitt 7.3.2) und die Bewertung der Integration digitaler Technologien (Abschnitt 7.3.3) anhand des Anwendungsbeispiels durchgeführt. Diese Durchführung sowie ihre wesentlichen Ergebnisse sind nachstehend beschrieben.

#### 7.3.1 Informationsflussorientierte Wertstromanalyse

Zunächst werden im Rahmen der informationsflussorientierten Wertstromanalyse die zu untersuchenden Produktfamilien ermittelt, um daraus die zu betrachtende Produktionsprozesskette ableiten zu können. Aufgrund der Produktvarianz im Produktionsprogramm des Anwendungsbeispiels werden sechs Hauptvarianten gebildet, wobei jede Hauptvariante zwischen  $10^2$  und  $10^4$  mögliche Produktvarianten innehat. Abbildung 7.1 führt den Variantenbaum zu den sechs Hauptvarianten auf, denen die Produktvarianten zugeordnet werden können.

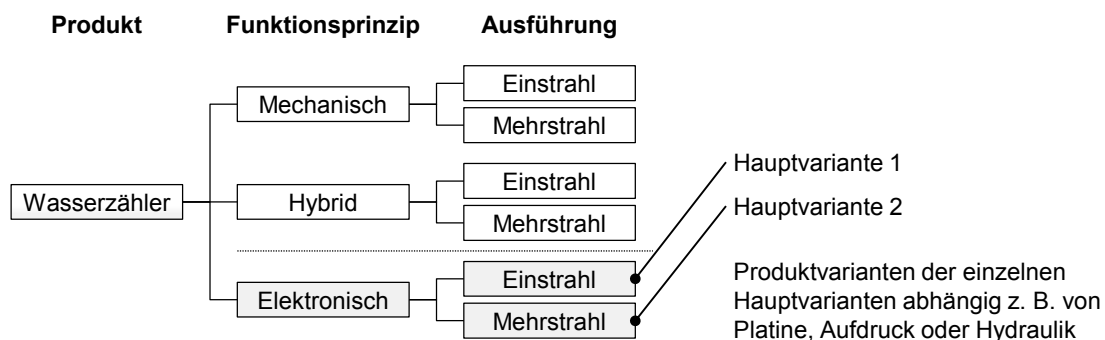


Abbildung 7.1: Variantenbaum der Hauptvarianten

Diese Hauptvarianten sind in der Produktfamilienmatrix von Tabelle 7.1 den Produktionsbereichen gegenübergestellt, denen entsprechende Produktionsprozesse zugehörig sind. Im Folgenden werden die Produkte der Hauptvarianten elektronischer Ein- und Mehrstrahlwasserzähler sowie die ihnen zugehörigen Produktvarianten weiter betrachtet. Diese lassen sich aufgrund der gleichen Produktionsprozessabfolge der Produktfamilie III zuordnen. Nachstehend ist die Untersuchung der Wertströme zu den Produktionsbereichen Funkmontage, Heißwasserdesinfizieren und Verpacken mit den betreffenden Produktionsprozessen und Puffern beschrieben. Die Wahl fällt auf diese Produktionsbereiche, da zum einen ein hoher Kundenbedarf nach Produkten dieser Produktfamilie vorliegt und zum anderen diese Produktionsbereiche einen Engpass darstellen.

Tabelle 7.1: Produktfamilienmatrix der Hauptvarianten

Hauptvarianten	Produktionsbereiche								Kundentakt [s]	Produktfamilie	
	Spanende Bearbeitung	Refabrikation	Hydraulikmontage	Zählwerksmontage	Elektronikmontage	Funkmontage	Ofendesinfizieren	Heißwasserdesinfizieren			Verpacken
Mechanisch (Einstrahl)	x	x	x	x			x		x	20,2	I
Mechanisch (Mehrstrahl)	x	x	x	x					x	18,0	I
Hybrid (Einstrahl)	x	x	x		x		x		x	23,7	II
Hybrid (Mehrstrahl)	x	x	x		x		x		x	21,8	II
Elektronisch (Einstrahl)	x	x	x			x		x	x	18,9	III
Elektronisch (Mehrstrahl)	x	x	x			x		x	x	19,2	III

Die für die Produktionsprozesse dieser Produktionsbereiche benötigten Vorprodukte werden sowohl von internen als auch externen Lieferanten bereitgestellt. Am Ende verpackte Produkte gehen nachgelagert zum Warenausgang. Übergeordnete Informationen zum Kunden und zum Produktionssystem sind in Abbildung 7.2 dokumentiert.

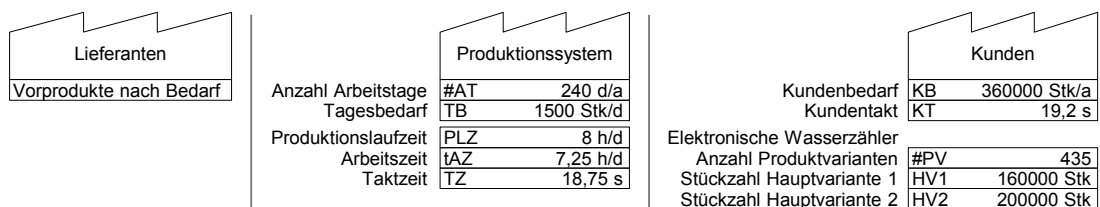


Abbildung 7.2: Informationen zu Lieferanten, Produktionssystem und Kunden

Die in der Produktfamilienmatrix aufgeführten Produktionsbereiche des betrachteten Produktionssystems bestehen aus einer Produktionsprozesskette mit neun Produktionsprozessen, die durch zwischengeschaltete Puffer entkoppelt sind. Bei diesen Produktionsprozessen liegen sowohl Einzelstückproduktion als auch Chargenproduktion vor, die teilweise an identischen und zeitgleich arbeitenden Betriebsmitteln erfolgen.

Zu dieser Produktionsprozesskette werden die Material- und Informationsflüsse im Rahmen der informationsflussorientierten Wertstromanalyse zunächst detailliert auf Makro- und Mikroebene erfasst. Die hierfür benötigten Daten und Informationen werden durch Messungen im Produktionssystem vor Ort, durch Erfahrungswerte des Produktionsleiters und ergänzend durch Auszüge aus dem Produktionsleitsystem und der zugehörigen Datenbank aufgenommen und dokumentiert. Aufgrund der jeweiligen prozessspezifischen digitalen Anbindung der Informationsflussteilnehmer auf dem Shopfloor werden nicht zu allen Produktionsprozessen automatisiert Daten und Informationen im Produktionsleitsystem abgebildet. Folglich sind neben den automatisiert erfassten historischen Daten und Informationen durchschnittlich auftretende Werte zu Zeit- und Qualitätsverlusten von einzelnen Produktionsprozessen durch Messungen vor Ort und durch Abstimmungen mit dem Produktionsleiter zu ermitteln. Aufbauend auf den aufgenommenen Material- und Informationsflüssen erfolgt die Identifikation von klassischer und informationsbedingter Verschwendung. Abbildung 7.3 und Abbildung 7.4 führen den aufgenommenen Wertstrom und die identifizierten Verschwendungen auf Makroebene auf.

Der informationsflussorientierte Wertstrom auf Makroebene zeigt die einzelnen Produktionsprozesse, die Puffer sowie die zugehörigen Parameterwerte auf. Darüber hinaus werden die jeweiligen Informationsflüsse der einzelnen Informationsflussteilnehmer der Ebenen 1, 2 und 3 abgebildet. Hierbei werden sowohl einfach gerichtete als auch synchronisierende Informationsflüsse dokumentiert. Im betrachteten Wertstrom liegen keine Anlaufvorgänge vor. Zudem kommen keine Zeitverluste bedingt durch fehlende Aufträge vor. Aus historischen Daten des Produktionsleitstands wurden Zeiten für technische Störungen und Kurzstillstände entnommen. Gesonderte Zeiten für Langsamlauf können nicht aufgeführt werden, da in den durch den Produktionsleitstand dokumentierten Daten keine Differenzierung nach Kurzstillständen und Langsamlauf vorliegt. Entsprechend spiegeln die verwendeten Daten das Unterbrechungsverhalten von Kurzstillständen wider, weshalb im Wertstrom Durchschnittswerte zu Zeitverlusten durch Kurzstillstände und keine Zeitverluste durch Langsamlauf aufgeführt werden. Organisatorische Störungen bedingt durch jeweils vor- und nachgelagerte Produktionsprozesse treten vereinzelt auf, insbesondere wenn die mit dem je-

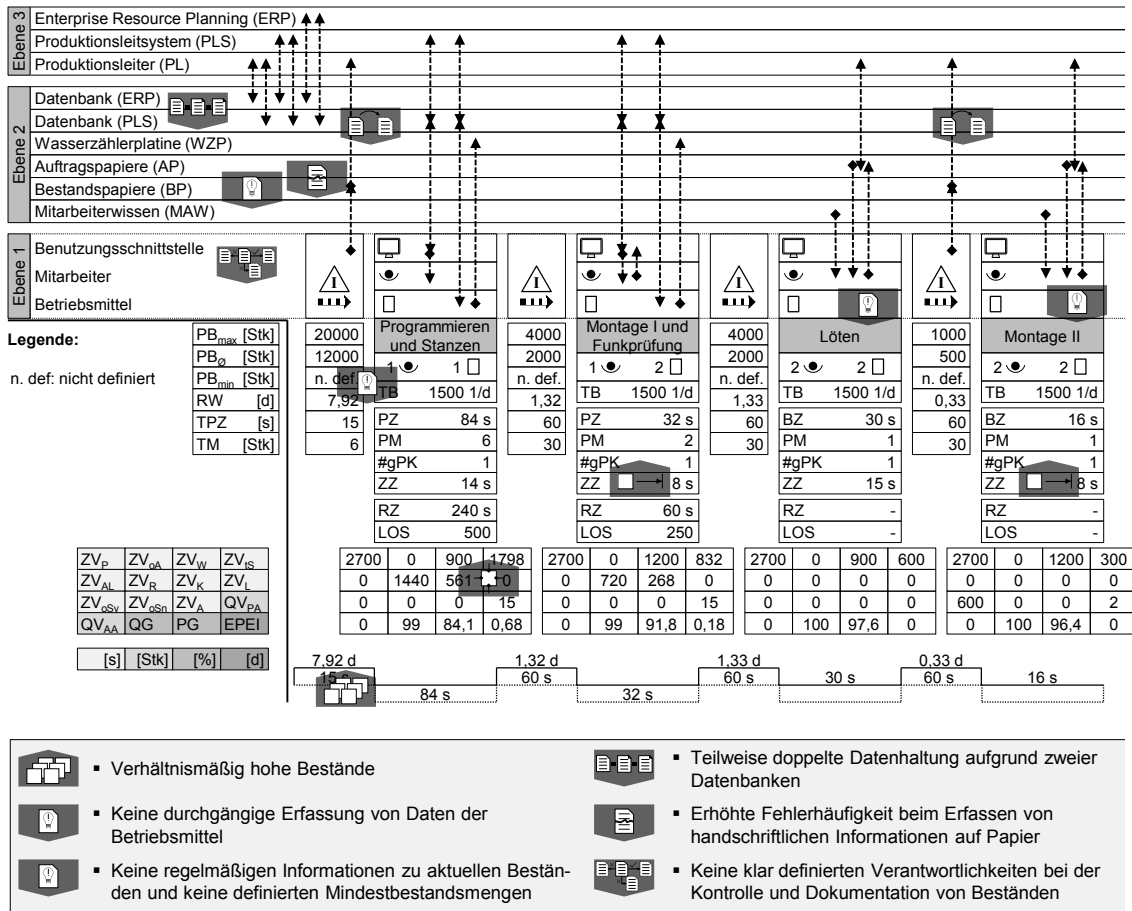


Abbildung 7.3: Informationsflussorientierter Wertstrom auf Makroebene und identifizierte Verschwendung (Ausschnitt I/II)

weiligen Produktionsprozess gekoppelten Puffer verhältnismäßig geringe Bestände aufweisen. Zudem werden vereinzelte Ablaufdefizite festgestellt, vor allem bei Produktionsprozessen, in denen Mitarbeiter mehrere Informationsträger für zusätzliche Dokumentationsstätigkeiten handhaben müssen.

Auf dieser Grundlage lässt sich die Analyse des Wertstroms hinsichtlich klassischer und informationsbedingter Verschwendung durchführen. Die identifizierten Verschwendungen sind in den beiden Abbildungen auszugsweise aufgeführt. Beispielsweise wird durch den auf Makroebene analysierten informationsflussorientierten Wertstrom deutlich, dass jeweils individuelle Informationsflüsse der Informationsflussteilnehmer von Ebene 1 zu den Ebenen 2 und 3 bei den einzelnen Produktionsprozessen vorliegen. Der Informationsfluss erfolgt beim Produktionsprozess Löten lediglich zum Mitarbeiter während bei der Montage III alle Informationsflussteilnehmer mit den Ebenen 2 bzw. 3 in Verbindung stehen. Folglich handelt es sich um uneinheitliche informationsbezogene Abläufe entlang der Produktionsprozesskette.



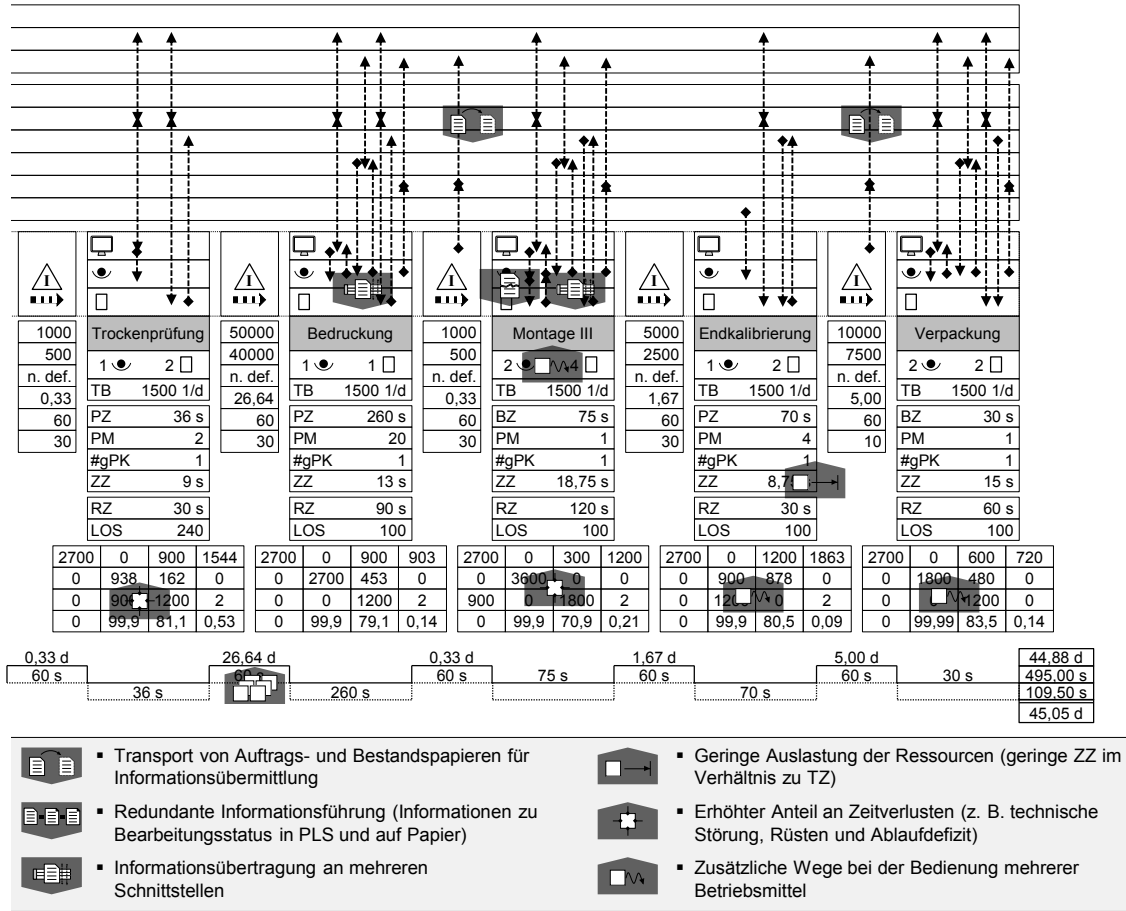


Abbildung 7.4: Informationsflussorientierter Wertstrom auf Makroebene und identifizierte Verschwendung (Ausschnitt II/II)

Zudem wird aufgezeigt, wie unterschiedliche Daten- und Informationsträger eingebunden werden und wie diese Einbindung zu redundanter Informationshaltung und Fehlern bei der Auftragsabwicklung führt. Darüber hinaus werden ungenutzte Potenziale hinsichtlich einer durchgängigen Erfassung von Betriebsmitteldaten oder von Informationen zu Beständen aufgedeckt. Des Weiteren lässt sich anhand des aufgenommenen Wertstroms feststellen, dass eine ungleichmäßige Auslastung der einzelnen Produktionsprozesse im Abgleich mit der verfügbaren Taktzeit vorliegt. Insbesondere der Produktionsprozess Montage III liegt mit einer Zykluszeit von 18,75 s nur knapp unter dem verfügbaren Kundentakt von 19,2 s. Bereits geringfügige Einschränkungen in diesem Produktionsprozess durch Zeit- oder Qualitätsverluste (z. B. Ablaufdefizite) können dazu führen, dass in der Montage III der Kundentakt überschritten wird und die erforderliche Stückzahl an Wasserzählern nicht erreicht wird. Die Montage III weist zudem einen vergleichsweise hohen Gesamtumfang der Zeitverluste durch Rüsten auf.

Aufbauend auf den auf Makroebene dargestellten Zusammenhängen und den identifizierten Verschwendungen wird die Beschreibung der einzelnen Produktionsprozesse auf Mikroebene näher ausdetailliert, um dadurch weitere Verschwendungen identifizieren zu können. Aufgrund des repetitiven Charakters der Wertstromaufnahme und -analyse zu einzelnen Produktionsprozessen wird im Folgenden einzig der Produktionsprozess Montage III auf Mikroebene dargestellt. In dieser Darstellung sind Zeitanteile, die zyklisch nach einer gewissen Stückzahl anfallen, auf einzelne Vorgänge skaliert. Zyklische Vorgänge sind beispielsweise das handschriftliche Ausfüllen der Auftragspapiere, was im vorliegenden Wertstrom in der Regel in Abhängigkeit der Transportmenge durchgeführt wird. Die nachstehende Abbildung 7.5 stellt den analysierten informationsflussorientierten Wertstrom von Montage III auf Mikroebene dar.

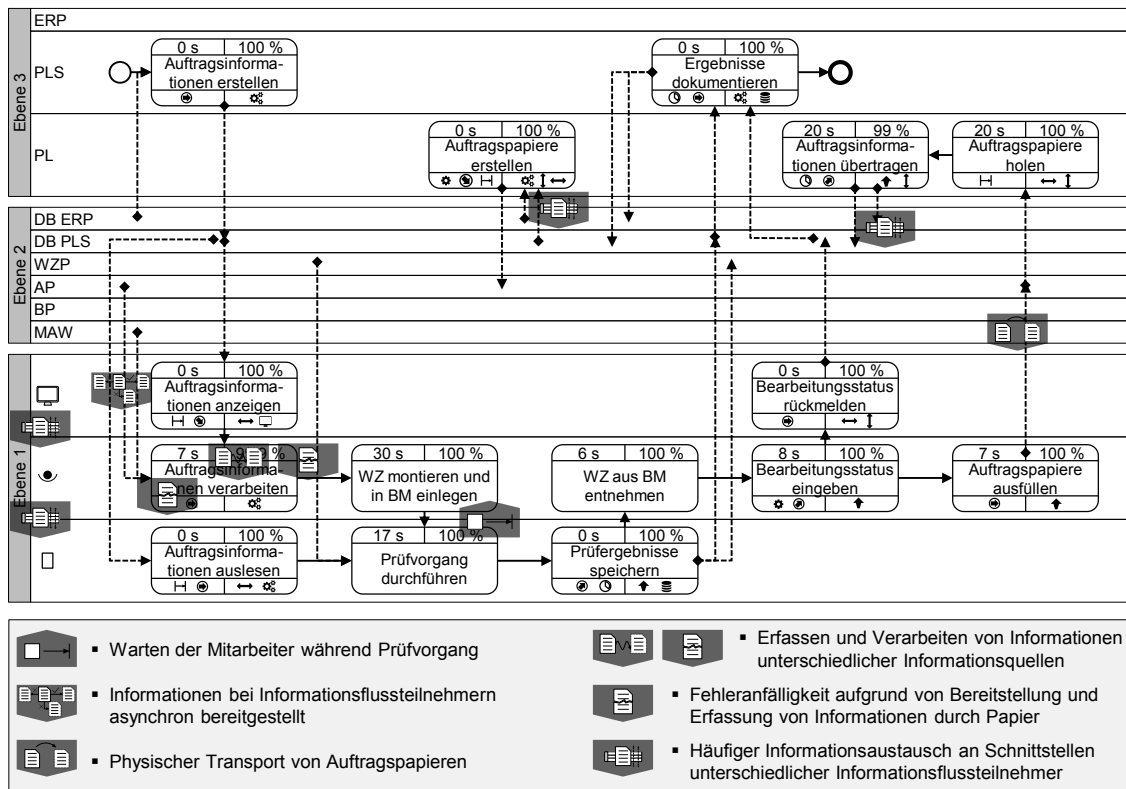


Abbildung 7.5: Informationsflussorientierter Wertstrom der Montage III auf Mikroebene und identifizierte Verschwendung

Anhand der Verschwendungsidentifikation auf Mikroebene werden zusätzliche Zeit- sowie Qualitätsverluste deutlich, die sich auf informationsbezogene Prozesse zurückführen lassen. Beispielsweise fallen weitere Zeitaufwände an, da Mitarbeiter sowohl in digitaler als auch in analoger Form bereitgestellte Informationen verarbeiten und

nachgelagert Bearbeitungsinformationen auf mehreren Wegen rückmelden müssen. Diese zusätzlichen verschwendungsbehafteten Vorgänge können als Zeitverlust durch Ablaufdefizit dokumentiert werden. In Bezug auf die Ablaufdefizite der Montage III werden die täglichen Zeitverluste vom Produktionsleiter mit einer halben Stunde (1800 s) angegeben, die im vorliegenden Beispiel anteilig in den Prozessen „Auftragsinformationen verarbeiten“ und „Auftragspapiere ausfüllen“ enthalten sind. Zudem werden über die durch diese informationsbezogenen Prozesse gebundenen Kapazitäten hinaus auch weitere informationsbezogene Prozesse des Produktionsleiters identifiziert, die für zusätzliche Dokumentationsaufwände anfallen. Anschließend werden die Ursachen der identifizierten Verschwendungen in einem Workshop anhand des Ursache-Wirkungs-Diagramms ermittelt. Abbildung 7.6 führt ermittelte informationsbedingte Ursachen sowohl zu den informationsbedingten als auch zu den klassischen Verschwendungen des informationsflussorientierten Wertstroms beispielhaft und auszugsweise auf. Das Beispiel verdeutlicht, dass einzelne Verschwendungen nicht zwingend durch einzelne Ursachen bedingt sein müssen, sondern mehrere Ursachen bei einer Verschwendung vorliegen können und umgekehrt.

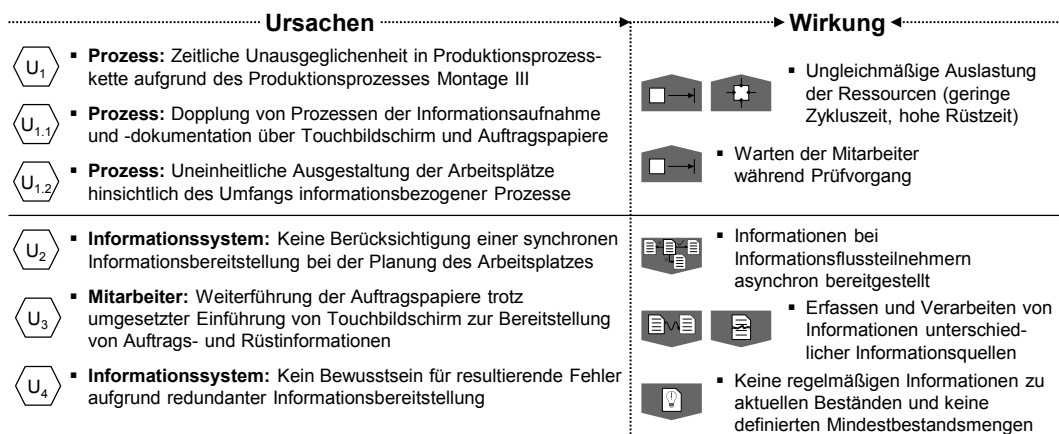


Abbildung 7.6: Ergebnisse der Ursache-Wirkungs-Analyse

### 7.3.2 Informationsflussorientiertes Wertstromdesign

Aufbauend auf der informationsflussorientierten Wertstromanalyse erfolgt das informationsflussorientierte Wertstromdesign. Hierfür werden in einem weiteren Schritt zunächst gestaltungsansatzbasierte Maßnahmen generiert, wie der betrachtete Wertstrom gestaltet und verbessert werden kann, um auf dieser Grundlage identifizierte Verschwendungen und ihre Ursachen beheben zu können. Die im vorstehenden Abschnitt aufgeführten Beispiele identifizierter Verschwendungen und deren Ursachen

werden im weiteren Verlauf näher untersucht. Die hierbei generierten gestaltungsansatzbasierten Maßnahmen sowie ihre Wirkungen sind nachstehend beschrieben. Durch die Maßnahmen sollen die Ursachen identifizierter Verschwendung und folglich die Verschwendungen selbst behoben werden können. Teile der im Anwendungsbeispiel durch das Ursache-Wirkungs-Maßnahmen-Diagramm generierten Maßnahmen sowie die erwarteten Wirkungen auf die Verschwendungen sind in Abbildung 7.7 aufgeführt.

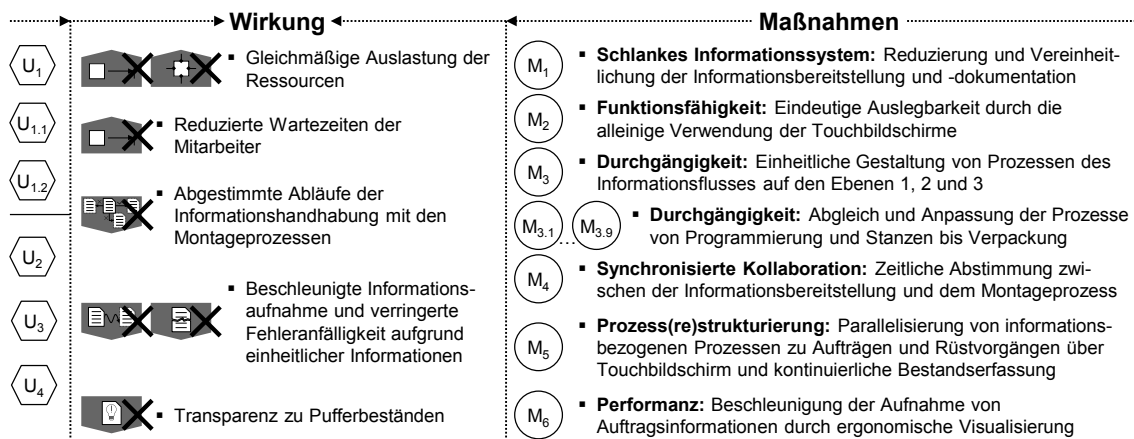


Abbildung 7.7: Gestaltungsansatzbasierte Maßnahmen und ihre Wirkung

Die beispielhaft aufgeführten Maßnahmen können ihre Wirkung hinsichtlich unterschiedlicher Verschwendungen entfalten, weshalb in diesem Fall keine eindeutige Zuordnung der Maßnahmen zu den Verschwendungen und ihren Ursachen vorgenommen wird. Um die generierten Maßnahmen in einem weiteren Schritt zu priorisieren, werden diese bezüglich ihres Aufwands zur Realisierung sowie des zu erwartenden Nutzens in Bezug auf den betrachteten Wertstrom durch die Prozessverantwortlichen und Experten bewertet. Diese Aufwand-Nutzen-Bewertung ist in Abbildung 7.8 aufgeführt.

In Bezug auf die einzelnen Abläufe des Wertstroms hat insbesondere die Maßnahme M<sub>5</sub> ein sehr gutes Aufwand-Nutzen-Verhältnis. Hier können direkt reduzierte Wartezeiten der Mitarbeiter erwirkt werden, indem Prozesse der Informationserfassung von Rüsttätigkeiten und von der Dokumentation von Aufträgen vorverlagert und zum Prüfprozess parallelisiert werden. Bei der Maßnahmenreihe zu M<sub>3</sub> werden insgesamt hohe Aufwände und zugleich ein hoher Nutzen erwartet. Unter der vereinfachenden Annahme, dass M<sub>3.1</sub> zuerst und M<sub>3.9</sub> zuletzt realisiert wird, wird aufgrund von Lern-

und Erfahrungseffekten von einer Reduzierung des Aufwands mit jeder weiteren realisierten Maßnahme der Maßnahmenreihe zu M<sub>3</sub> ausgegangen.

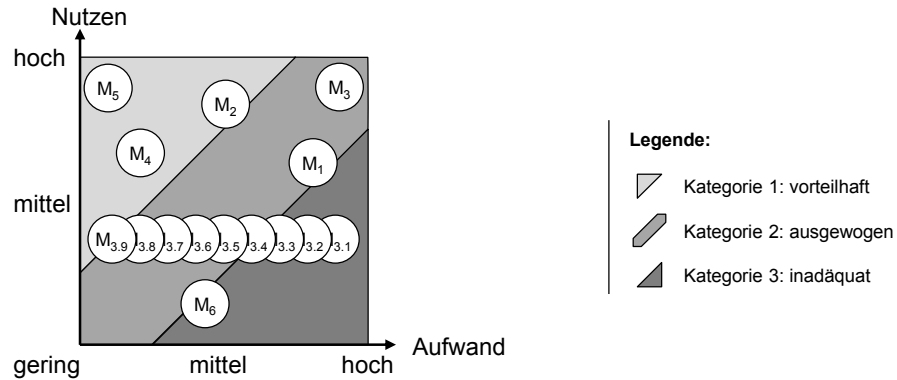


Abbildung 7.8: Aufwand-Nutzen-Bewertung generierter Maßnahmen

Auf Grundlage der priorisierten Maßnahmen erfolgt in einem weiteren Schritt der Aufbau des Soll-Wertstroms. Hierfür wird zunächst der jeweilige Soll-Wertstrom zu den einzelnen Produktionsprozessen auf Mikroebene aufgebaut. Im Zuge dessen werden Abschätzungen zu den theoretisch realisierbaren Werten zu Zeit und Qualität der einzelnen Prozesse getroffen. Abbildung 7.9 zeigt den entwickelten Soll-Wertstrom auf Mikroebene am Beispiel des Produktionsprozesses Montage III auf.

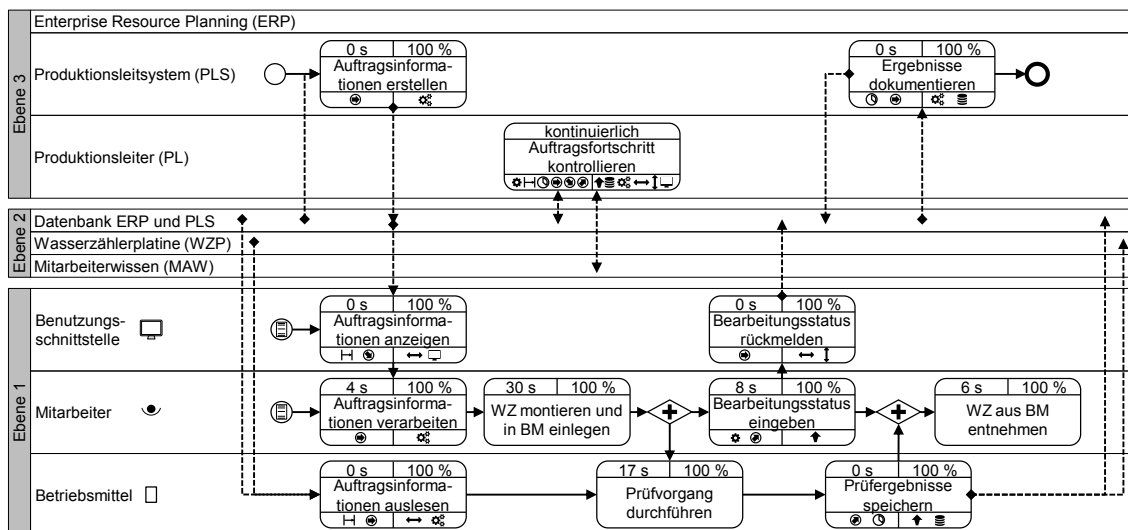


Abbildung 7.9: Soll-Wertstrom von Montage III auf Mikroebene

Nach Erstellung des jeweiligen Soll-Wertstroms der einzelnen Produktionsprozesse auf Mikroebene wird der Soll-Wertstrom auf Makroebene entwickelt. In diesem Zusammenhang werden resultierende Parameter wie Bearbeitungs- bzw. Prozesszeiten und Zykluszeiten aggregiert. Die nachstehende Abbildung 7.10 zeigt den entwickelten Soll-Wertstrom auf Makroebene anhand der übergeordneten Zusammenhänge der letzten drei Puffer und Produktionsprozesse der Produktionsprozesskette auf.

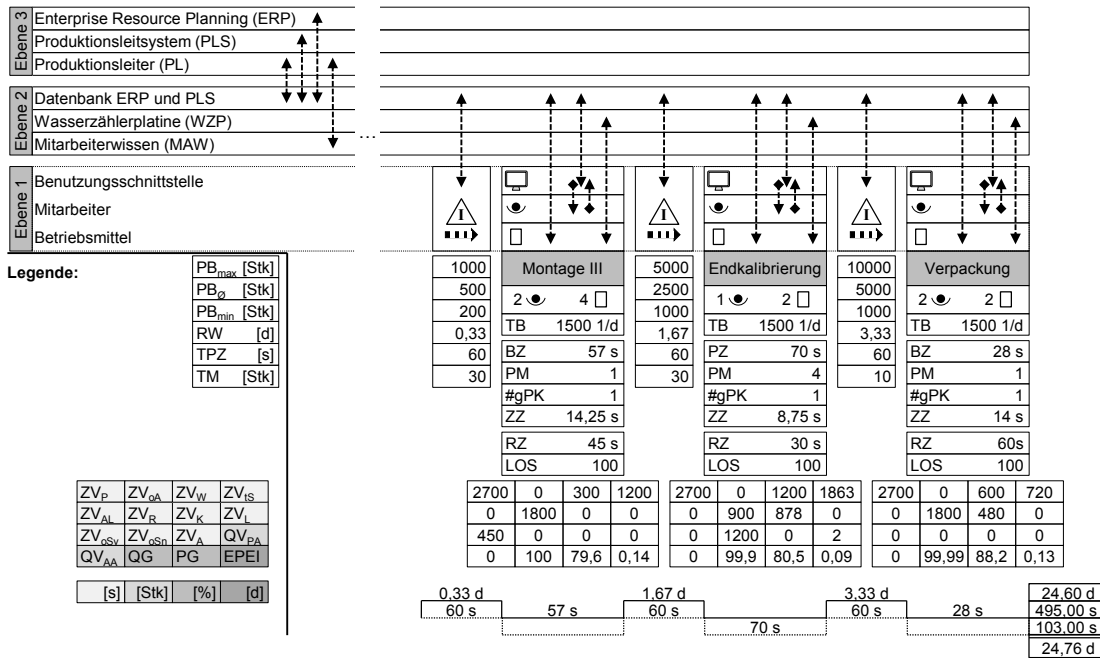


Abbildung 7.10: Soll-Wertstrom auf Makroebene (auszugsweise)

Der auf Makro- und Mikroebene aufgezeigte Soll-Wertstrom stellt den Idealzustand der betrachteten Abläufe und Prozesse dar. Um diesen Idealzustand realisieren zu können, bedarf es der Realisierung ermittelter Maßnahmen durch Integrationsanpassung bestehender Informationsflussteilnehmer bzw. digitaler Technologien oder durch Integrationsneuerung bisher nicht betrachteter Informationsflussteilnehmer bzw. digitaler Technologien. Beispielsweise sind die digitalen Technologien Produktionsleitsystem und Touchbildschirme für die Maßnahme M<sub>2</sub>, die eine alleinige Verwendung der Touchbildschirme fokussiert, hinsichtlich ihrer prozessualen Integration im Rahmen einer Integrationsanpassung zu untersuchen. Die grundlegenden Fähigkeiten der kombinierten Betrachtung dieser beiden digitalen Technologien beziehen sich auf alle Transformationsarten, Funktionen sowie Gestaltungsansätze. Die in diesem Zusammenhang vorgesehene Anpassung adressiert beispielsweise die Bearbeitungszeit von Montage III, da aufgrund der Informationsbereitstellung alleinig

durch die Touchbildschirme eine Verkürzung der Zeiten für das Verarbeiten der benötigten Auftragsinformationen zu erwarten ist. Im direkten Vergleich der Bearbeitungszeit von Montage III zwischen Ist- und Soll-Wertstrom wird eine zeitliche Reduzierung von 75 s auf 57 s unter Berücksichtigung aller Maßnahmen als möglich erachtet. Durch die prozessuale Integration unter Berücksichtigung der Maßnahme M<sub>2</sub> gehen die Prozessverantwortlichen und Experten von einer anteiligen Reduzierung von ca. 3 s aus. Werden weitere Maßnahmen realisiert, so sind weitere zeitliche Einsparungen zu erwarten.

Die weiteren entwickelten Maßnahmen werden vergleichbar hinsichtlich ihrer prozessualen Integration durch Prozessverantwortliche sowie Experten für die jeweils betrachteten digitalen Technologien und betroffenen Informationsflussteilnehmer durchgeführt. Aus diesen prozessualen Integrationen werden in einem weiteren Schritt die Auswirkungen auf die Produktionsprozesskette untersucht.

### 7.3.3 Bewertung der Integration digitaler Technologien

In einem weiteren Schritt sind die aus den Maßnahmen abgeleiteten Integrationen digitaler Technologien insbesondere hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die GPS-Zielgrößen des betrachteten Wertstroms zu untersuchen. Um diese Untersuchungen, ausgehend vom aufgenommenen und analysierten Ist-Wertstrom unter Berücksichtigung von Wirkzusammenhängen, anzustellen, bedarf es eines Referenzmodells. Dieses bildet das wesentliche Verhalten der betrachteten Produktionsprozesskette in einem experimentierfähigen Simulationsmodell ab. Die im Rahmen der Wertstromaufnahme ermittelten Werte zu den GPS-Zielgrößen werden durch das nach dem Ist-Wertstrom parametrisierte Simulationsmodell mit den simulativ ermittelten Werten der GPS-Zielgrößen gegenübergestellt. So lassen sich die prozentualen Abweichungen zwischen Ist-Wertstrom und dem Simulationsmodell hinsichtlich der GPS-Zielgrößen ableiten. Die ermittelten Abweichungen sind in Abbildung 7.11 aufgeführt.

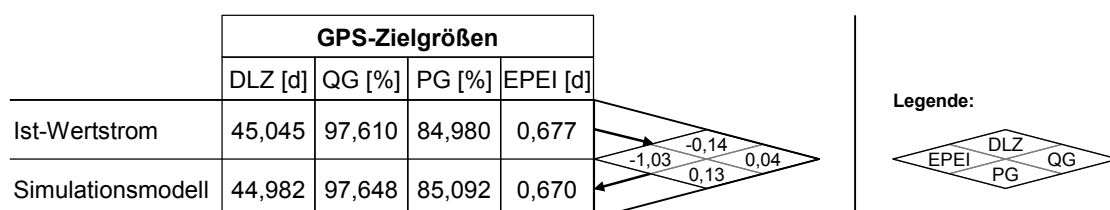


Abbildung 7.11: Prozentuale Abweichungen zu den Werten der GPS-Zielgrößen zwischen Ist-Wertstrom und Simulationsmodell

Die maximale prozentuale Abweichung im betrachteten Fall liegt bei dem Wert zu EPEI vor und beträgt -1,03 %, weshalb das Simulationsmodell von den Prozessverantwortlichen als hinreichend genau eingestuft wird. Daher kann das nach dem Ist-Wertstrom parametrisierte Simulationsmodell fortan als Referenzmodell verwendet werden, um es zum Vergleich von Integrationsszenarien zu verwenden.

Anschließend werden basierend auf den ermittelten Maßnahmen und den zugehörigen Integrationsbeschreibungen Integrationsszenarien erstellt. In Bezug auf die in Abbildung 7.7 aufgeführten 15 Maßnahmen<sup>16</sup> ( $b = 15$ ) lassen sich nach der Formel (6.6) insgesamt  $3,55 \cdot 10^{12}$  und bei einer Integrationstiefe von zwei ( $c = 2$ ) 225 theoretisch mögliche Integrationsszenarien ableiten. Aufgrund der durchgeführten Priorisierung der Maßnahmen (vgl. Abbildung 7.8) werden die Maßnahmen  $M_2$ ,  $M_4$  und  $M_5$  des Anwendungsbeispiels im weiteren Verlauf näher betrachtet. Die bei drei Maßnahmen theoretisch möglichen 15 Integrationsszenarien werden von den Prozessverantwortlichen für die weiteren Untersuchungen auf fünf Integrationsszenarien<sup>17</sup> eingeschränkt. Hierfür werden die maßnahmenbezogenen prozessualen Integrationen für die Integrationsszenarien  $IS_2$ ,  $IS_4$ ,  $IS_5$ ,  $IS_{2,5}$  und  $IS_{5,2}$  verwendet.

Um die Auswirkungen dieser Integrationsszenarien auf die Produktionsprozesskette zu prognostizieren, werden die resultierenden Werte der GPS-Zielgrößen basierend auf dem Referenzmodell ermittelt. Das Referenzmodell wird entsprechend den maßnahmenbasierten prozessualen Integrationen parametrisiert, wodurch die Abweichungen der Zielgrößen zum Referenzmodell aber auch zwischen den Integrationsszenarien abgeleitet werden können. In Abbildung 7.12 sind die prognostizierten Werte zu den Integrationsszenarien sowie die prozentualen Abweichungen als Entscheidungsgrundlage aufgeführt. Ein Simulationsdurchlauf für einen Betrachtungshorizont von einem Jahr benötigte für das Referenzmodell und die Integrationsszenarien im Durchschnitt 48,4 Minuten auf einem Notebook mit einer Intel® Core™ i7 CPU (1,80 GHz) und mit einem Arbeitsspeicher von 16,0 GB.

Die Gegenüberstellung der Werte zu den Zielgrößen von dem Referenzmodell und von den Integrationsszenarien zeigt im betrachteten Anwendungsbeispiel auf, dass bei den Integrationsszenarien  $IS_{2,5}$  und  $IS_{5,2}$  verstärkende Effekte in Bezug auf die Integrationsszenarien  $IS_2$  und  $IS_5$  auftreten können. Auf diese verstärkenden Effekte

---

<sup>16</sup> Die Maßnahme  $M_3$  wird in dieser Aufzählung nicht gesondert gezählt, da sie sich aus der Maßnahmenreihe  $M_{3,1}$  bis  $M_{3,9}$  zusammensetzt.

<sup>17</sup> Der jeweilige Index eines Integrationsszenarios  $IS$  bildet die berücksichtigten Maßnahmen sowie deren Reihenfolge ab. Beispielsweise repräsentiert  $IS_{2,5}$  dasjenige Integrationsszenario, bei dem die prozessualen Integrationen von Maßnahme  $M_2$  und  $M_5$  enthalten sind.



kann geschlossen werden, da im Vergleich zum Referenzmodell die Summe der Abweichungen durch IS<sub>2</sub> und IS<sub>5</sub> geringer ist als die Abweichung durch IS<sub>2,5</sub> oder IS<sub>5,2</sub>. Aufgrund der Untersuchungen durch das System-Dynamics-Modell ist darauf zu schließen, dass die Parameterveränderungen durch die Maßnahmen M<sub>2</sub> und M<sub>5</sub> insbesondere verstärkende Effekte auf reduzierte Pufferbestände und reduzierte Zeitverluste haben. Beispielsweise treten trotz reduzierter Pufferbestände weniger organisatorische Störungen auf, da die Zykluszeiten und die Auslastung innerhalb der Produktionsprozesskette durch die Maßnahmen geglättet werden können.

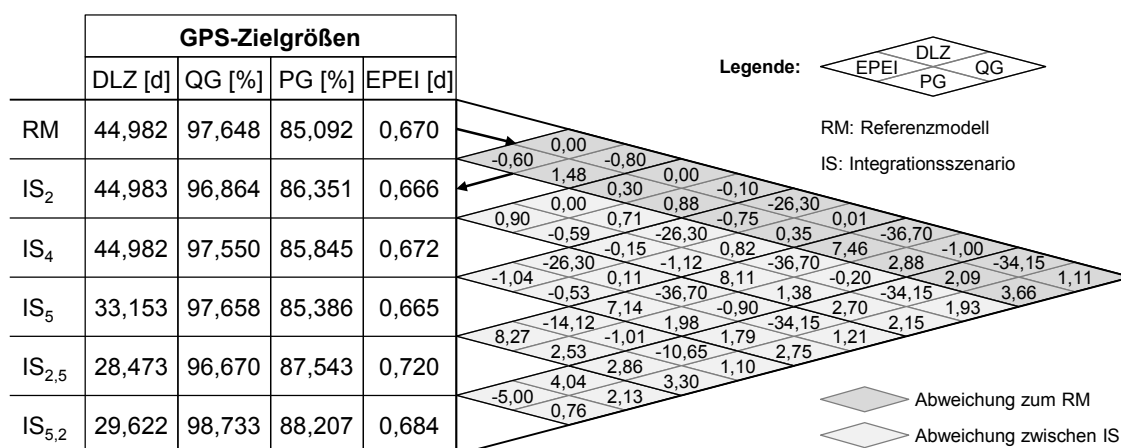


Abbildung 7.12: Prozentuale Abweichungen zu den Werten der GPS-Zielgrößen zwischen Referenzmodell und ausgewählten Integrationsszenarien

Auf Grundlage der prognostizierten Werte zu den Integrationsszenarien wird die Auswahl der Maßnahmen, mit deren Hilfe digitale Technologien in das bestehende Informationssystem integriert werden sollen, unterstützt. IS<sub>5,2</sub> mit den zugehörigen Maßnahmen M<sub>5</sub> und M<sub>2</sub> wird von den Prozessverantwortlichen aufgrund der zu erwartenden positiven und verstärkenden Effekte auf die GPS-Zielgrößen präferiert.

## 7.4 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurde die Anwendung der Methodik in Bezug auf ein reales Anwendungsbeispiel dargestellt. Hierbei wurde anhand der Schritte der Vorgehensweise und unter Einbeziehung des Strukturmodells aufgezeigt, wie die Methodik bei der Integration digitaler Technologien in den Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme unterstützen kann. Ausgehend vom erfassten Wertstrom des Anwendungsbeispiels zu einer ausgewählten Produktfamilie wurde im Rahmen der informa-

tionsflussorientierten Wertstromanalyse Transparenz zur Struktur des Informationssystems sowie zu den Abläufen der Material- und Informationsflüsse geschaffen. Darauf aufbauend wurden informationsbedingte Verschwendungen identifiziert sowie ihre Ursachen ermittelt. Anschließend wurde im informationsflussorientierten Wertstromdesign ein verschwendungsarmer Soll-Wertstrom anhand der informationsbezogenen Gestaltungsansätze entwickelt. Zudem wurden erforderliche Maßnahmen und ihre Auswirkungen auf Prozesse des Wertstroms abgeleitet. Abschließend wurden durch die Maßnahmen Integrationsszenarien aufgestellt, deren Auswirkungen auf die GPS-Zielgrößen anhand des System-Dynamics-Modells ermittelt wurden. Die geschaffene Transparenz zum Wertstrom und die Vergleichbarkeit von Integrations-szenarien dienen als Basis, um Entscheidungen hinsichtlich der Realisierung von Maßnahmen zur Verbesserung des Wertstroms zu unterstützen. Hierbei wurde dargestellt, wie das Strukturmodell und die Vorgehensweise der Methodik bei der Verbesserung von Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme durch zielgerichtete Informationsflüsse unterstützen. Anhand des Anwendungsbeispiels konnte ein erfolgreicher Einsatz der Methodik in der industriellen Praxis aufgezeigt werden.

## **8 Kritische Würdigung**

### **8.1 Überblick**

Die kritische Würdigung der Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme untergliedert sich in mehrere Schritte. Zunächst wird ein allgemeines Vorgehen beschrieben, mit welchem die technisch-wirtschaftliche Bewertung der jeweiligen Anwendung der Methodik erfolgen kann (Abschnitt 8.2). Anschließend wird mit diesem Vorgehen die Bewertung der Methodik anhand des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 7 durchgeführt (Abschnitt 8.3). Darüber hinaus werden Limitationen skizziert, die begleitend zum Forschungsprozess identifiziert wurden (Abschnitt 8.4), ehe die Erfüllung der Anforderungen an die Methodik beschrieben wird (Abschnitt 8.5). Das Kapitel schließt mit einem Fazit (Abschnitt 8.6).

### **8.2 Technisch-wirtschaftliche Bewertung**

#### **8.2.1 Allgemeines**

Die technisch-wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Methodik kann bedingt allgemeingültig durchgeführt werden, weil die Bewertung jeweils von unterschiedlichen unternehmensspezifischen Gegebenheiten abhängt. Zu diesen zählen beispielsweise die vorhandene Datengrundlage des Untersuchungsgegenstands, das Wissen und die Erfahrungen der Anwender der Methodik oder der Umfang zu realisierender Integrationsszenarien. Bei der technisch-wirtschaftlichen Bewertung der entwickelten Methodik ist der entstehende Aufwand dem zu erwartenden Nutzen gegenüberzustellen. In diesem Zusammenhang werden der zu betrachtende Aufwand (Abschnitt 8.2.2), der zu betrachtende Nutzen (Abschnitt 8.2.3) sowie ein Vorgehen zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung der Methodik (Abschnitt 8.2.4) vorgestellt.

#### **8.2.2 Aufwand**

Die zu betrachtenden Aufwände können sich aus einmaligen und laufenden Kosten zusammensetzen. Zu einmaligen Kosten zählen zum einen die Kosten der Arbeitszeiten der Anwender der Methodik, um die Schritte ihrer Vorgehensweise durchzuführen. Zum anderen sind die Kosten für die Realisierung der Maßnahmen ausgewählter Integrationsszenarien zu berücksichtigen. Diese Aufwände können sich sowohl aus sach- als auch aus personenbezogenen Kosten zusammensetzen. Beispielsweise kön-

nen die Maßnahmen der Integrationsszenarien mit Investitionskosten verbunden sein, um erforderliche Veränderungen am Informationssystem zu realisieren. Diese können sich neben der einfachen Veränderung von Arbeitsvorgängen auch in der Einbindung von bisher nicht integrierten digitalen Technologien äußern. Darüber hinaus können Qualifizierungsmaßnahmen notwendig werden, um die Mitarbeiter hinsichtlich der Veränderungen ihrer auszuführenden Arbeitsvorgänge zu unterweisen oder die Mitarbeiter mit neu eingebundenen digitalen Technologien vertraut zu machen. In Bezug auf die Integration digitaler Technologien sei aufgeführt, dass neben fixen Kosten für deren Anschaffung auch laufende bzw. variable Kosten entstehen können. Oftmals ist dies auf die jeweiligen Geschäftsmodelle von Anbietern digitaler Technologien zurückzuführen, da die Verwendung von Lizenzen beispielweise nutzerbezogen ist oder monatliche Kosten für die Nutzung von Lizenzen erhoben werden.

### 8.2.3 Nutzen

Die Realisierung der Maßnahmen von Integrationsszenarien ist zielführend, wenn ein positiver Nutzen zu erwarten ist. Die Auswirkungen zu ergreifender Maßnahmen lassen sich mit der Methodik anhand der Veränderungen der Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme beschreiben. In diesem Zusammenhang liegt in der Regel eine unternehmensspezifische Gewichtung der einzelnen Zielgrößen vor, anhand derer sich der Nutzen quantifizieren lässt. Während die einen Unternehmen beispielsweise besonderen Wert auf die Reduzierung von Durchlaufzeiten und auf die Erhöhung von Flexibilität legen, um kurze Reaktionszeiten auf Kundenanfragen realisieren zu können, ist für andere Unternehmen die Steigerung von Produktivität und Qualität von besonderer Bedeutung, um Produktionsmengen erhöhen zu können. Hierbei ist die Veränderung einzelner Zielgrößen in einen monetären Bezug zu setzen.

Darüber hinaus kann ein qualitativer Nutzen durch die Anwendung der Methodik entstehen, der sich in unterschiedlicher Art und Weise äußert. Für gewöhnlich entsteht ein qualitativer Nutzen durch eine gesteigerte Transparenz zu den betrachteten Abläufen der Wertströme. Beispielsweise wird Transparenz zum aktuellen Zustand hinsichtlich der Produktionsprozessparameter und des Informationssystems durch die informationsflussorientierte Wertstromanalyse geschaffen. Darüber hinaus entsteht Transparenz durch das informationsflussorientierte Wertstromdesign, indem Veränderungs- sowie Verbesserungsmöglichkeiten erzeugt werden. Die geschaffene Transparenz lässt sich auch in weiteren Fachbereichen als der Produktion einsetzen oder kann auch bei fachbereichübergreifenden Fragestellungen unterstützen. Derartiger qualitativer Nutzen lässt sich jedoch nur bedingt monetarisieren.

### 8.2.4 Vorgehen

Um technisch-wirtschaftliche Aspekte der jeweiligen Anwendung der Methodik zu bewerten, werden zunächst der quantifizierbare Aufwand und der quantifizierbare Nutzen berücksichtigt. Hierbei ist die Wirtschaftlichkeit eines Integrationsszenarios gegeben, wenn der resultierende Nutzen den zu erbringenden Aufwand in einem annehmbaren Zeitrahmen übersteigt (KOLBERG ET AL. 2017B). In diesem Zusammenhang soll die statische Amortisationszeit bestimmt werden. Die Amortisationszeit ist die Zeitdauer, nach welcher der finanzielle Nutzen den finanziellen Aufwand der Anwendung der Methodik und der erforderlichen Investition in das jeweilige Integrationszenario übersteigt (GÖTZE 2014). Hierfür findet die Formel (8.1) Verwendung.

$$\text{Amortisationszeit [a]} = \frac{\text{finanzieller Aufwand [€]}}{\text{finanzieller Nutzen } \left[\frac{\text{€}}{\text{a}}\right]} \quad (8.1)$$

Der Aufwand und der Nutzen, die obenstehend aufgeführt wurden und die für die Ermittlung der Amortisationszeit verwendet werden, stellen die wesentlichen Bestandteile zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung dar (JOPPEN ET AL. 2019A, JOPPEN ET AL. 2019B). Ihre Ermittlung erfolgt demnach stets im unternehmensspezifischen Kontext. Auch lässt sich aufgrund branchen-, unternehmens- und anwendungsspezifischer Gegebenheiten kein genereller Grenzwert für die Amortisationszeit festlegen, bis zu welchem Integrationsszenarien grundsätzlich realisiert werden sollten. Aufgrund der Schnellebigkeit der Digitalisierung sollten Unternehmen allerdings verhältnismäßig kurze Amortisationszeiten anstreben. Neben der Amortisationszeit kann auch der qualitative Nutzen bei der technisch-wirtschaftlichen Bewertung berücksichtigt werden, falls dieser für Investitionsentscheidungen ausschlaggebend sein sollte (LIEBRECHT ET AL. 2017). Abbildung 8.1 zeigt beispielhaft die Einordnung unterschiedlicher Integrationsszenarien, um diese neben der Amortisationszeit auch in Bezug zum qualitativen Nutzen zu setzen und um die Einstufung nach vorteilhaft, ausgewogen bzw. inadäquat vorzunehmen.

Der quantitative und der qualitative Nutzen können sowohl von unternehmensspezifischen als auch von anwendungsbezogenen Gegebenheiten abhängen, weshalb eine allgemeingültige technisch-wirtschaftliche Bewertung der Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme an dieser Stelle nicht erfolgen kann. Jedoch bietet das aufgeführte Vorgehen einen Rahmen, mit welchem die Bewertung der Methodik im unternehmensspezifischen und anwendungsbezogenen Kontext hinsichtlich Integrationsszenarien erfolgen kann.



Abbildung 8.1: Einordnung von Integrationsszenarien in Bezug auf Amortisationszeit und qualitativen Nutzen

Nachstehend erfolgt dennoch die beispielhafte Bewertung der entwickelten Methodik, für welche die in Kapitel 7 beschriebene Anwendung zugrunde liegt. Der finanzielle Aufwand wird hierfür realitätsnah abgeschätzt und dem finanziellen Nutzen gegenübergestellt.

### 8.3 Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Anwendung

Um die Amortisationszeit hinsichtlich des Anwendungsbeispiels zu bestimmen, werden nachstehend der finanzielle Aufwand und der finanzielle Nutzen ermittelt. Die Bewertung des Aufwands der Methodik nimmt Bezug auf die Durchführung der Vorgehensweise mit den Schritten der informationsflussorientierten Wertstromanalyse, des informationsflussorientierten Wertstromdesigns sowie der Bewertung der Integration digitaler Technologien. Ergänzend werden die Aufwände für die Umsetzung der dem präferierten Integrationsszenario  $IS_{5,2}$  zugehörigen Maßnahmen  $M_5$  und  $M_2$  berücksichtigt. Die finanziellen Aufwände sind in Tabelle 8.1 aufgeführt.

Für die Anwendung der Methodik in Bezug auf das Anwendungsbeispiel fielen insgesamt 14,25 Personentage (PT) an. Hierzu zählen das Vor- und Nachbereiten sowie das Durchführen der Schritte der Methodik. Bei der Durchführung der Methodik selbst waren in der Regel mehrere Personen bzw. Mitarbeiter beteiligt, um insbesondere das unternehmensspezifische Prozess- und Expertenwissen in die Anwendung mit einzubringen. Bei der Ermittlung der finanziellen Aufwände werden die benötigten Zeiten für die jeweiligen Schritte in Personentagen mit einem durchschnittlichen Kostensatz von 900 €/PT berechnet. Folglich lagen die Aufwände für die Durchführung der Methodik bei 12.825 €. Darüber hinaus sind die Kosten für die Umsetzung der Maßnahmen des Integrationsszenarios bei den Aufwänden zu berücksichtigen.

Tabelle 8.1: *Finanzielle Aufwände der Anwendung der Methodik und zur Umsetzung des Integrationsszenarios IS<sub>5,2</sub>*

Schritte	Aufwände		Kosten
	[PT]	[€/PT]	[€]
<b>Anwendung der Methodik</b>			
1. Informationsflussorientierte Wertstromanalyse	6,5	900	5.850
2. Informationsflussorientiertes Wertstromdesign	5,75	900	5.175
3. Bewertung der Integration digitaler Technologien	2	900	1.800
<b>Umsetzung des Integrationsszenarios IS<sub>5,2</sub></b>			
1. Maßnahme M <sub>5</sub> :			11.500
2. Maßnahme M <sub>2</sub> :			6.000
<b>Summe</b>			<b>30.325</b>

Da bei dem Integrationsszenario ausschließlich Integrationsanpassungen am bestehenden Informationssystem vorgenommen werden sollen, ist hier lediglich mit zeitlichen Arbeitsaufwänden für die Umsetzung der Maßnahmen sowie für die Qualifizierung der Mitarbeiter zu rechnen. Hierfür werden Kosten für die Beauftragung des Implementierungsdienstleisters und für die nachgelagerten internen Qualifizierungsmaßnahmen vom Unternehmen abgeschätzt. Für die Maßnahmen M<sub>5</sub> und M<sub>2</sub> fallen keine Investitionskosten an. Bei Kosten in Höhe von 12.825 € für die Anwendung der Methodik, 11.500 € für Maßnahme M<sub>5</sub> und 6.000 € für Maßnahme M<sub>2</sub> ergeben sich somit Aufwände von insgesamt 30.325 €.

Der zu erwartende Nutzen lässt sich in dem Anwendungsbeispiel demgegenüber aus der prognostizierten Zielgröße des Produktivitätsgrads ableiten. Zwar liegen positive Auswirkungen auf Durchlaufzeit und Qualitätsgrad sowie negative Auswirkungen auf Every Part Every Interval vor, welche jedoch aufgrund der unternehmensspezifischen Zielgrößenvorriorisierung vernachlässigt werden können und bei der Ermittlung des finanziellen Nutzens somit nicht berücksichtigt werden müssen. Im Vergleich zur Ausgangssituation des Anwendungsbeispiels ist bei Umsetzung der Maßnahmen M<sub>5</sub> und M<sub>2</sub> mit einem um 3,66 % gesteigerten Produktivitätsgrad und entsprechend mit einer gesteigerten Produktionsmenge zu rechnen (vgl. Abbildung 7.12). Ausgehend von einer täglichen Produktionsmenge von 1500 Stück und einem Gewinn von 1,60 € pro hergestelltem Produkt lässt sich der Nutzen mit 21.081,60 €/a bemessen. Unter Berücksichtigung des finanziellen Aufwands und des finanziellen Nutzens resultiert nach Formel (8.1) eine Amortisationszeit von 1,44 Jahren, was in Bezug auf das Anwendungsbeispiel einen annehmbaren Zeitrahmen für das Unternehmen darstellt, bis sich die realisierten Maßnahmen als rentabel erweisen.

### 8.4 Limitationen

Ziel der entwickelten Methodik ist es, unterschiedliche Problemstellungen des beschriebenen Problemkontexts zu lösen. Das Strukturmodell und die Vorgehensweise der Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme wurden anhand der forschungsleitenden Anforderungen entwickelt sowie anhand einer spezifischen Problemstellung des Problemkontexts erprobt. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Forschungsprozesses Limitationen der Methodik identifiziert, die nachstehend aufgeführt sind.

Bei der Erstellung des Strukturmodells erfolgte die Konzentrierung wesentlicher Aspekte der Realität in Bezug auf den Problemkontext. Die für die Formalisierung entwickelte Modellierung fokussiert in Bezug auf Wertströme insbesondere wertschöpfende Tätigkeiten, für welche spezifische Parameter hergeleitet wurden. Die Untersuchung logistischer Abläufe in Bezug auf Puffer und Transport ist sekundär. Darüber hinaus werden mit der vordefinierten Prozessbeschreibung mit ihren Parametern Vorgaben getroffen (z. B. Beschreibung der Zeit- und Qualitätsverluste), die nicht vollständig mit dem Begriffsverständnis aller Unternehmen übereinstimmen können. Dies kann zu Anpassungsbedarfen vor der Anwendung der Methodik führen.

Für den Einsatz der Methodik findet vorrangig die Vorgehensweise Verwendung. Allerdings wird für eine korrekte Anwendung der Methodik Know-how nicht nur zur Vorgehensweise, sondern auch zum Strukturmodell vorausgesetzt. Folglich muss vor Anwendung der Methodik ein umfassendes und einheitliches Verständnis zu den Schritten der Vorgehensweise ebenso wie zu den Bestandteilen des Strukturmodells bei den Anwendern vorliegen. In diesem Zusammenhang sind beispielsweise die informationsbedingten Verschwendungsarten und die informationsbezogenen Gestaltungsansätze aufzuführen, die im Strukturmodell entwickelt wurden. Darüber hinaus bedarf es für die Verwendung des System-Dynamics-Modells eines grundlegenden Verständnisses zur systemdynamischen Simulation und zu den Hintergründen der Parametrierung des Simulationsmodells. Dies gilt insbesondere für die erstmalige Anwendung der Methodik, wenn ihre regelmäßige Durchführung noch nicht in der Aufbauorganisation verankert ist. Die unmittelbare Anwendung der Methodik in einem Unternehmen ist folglich nur eingeschränkt möglich. Entsprechend sind Aufwände für die Vorbereitung der erstmaligen Anwendung der Methodik zu berücksichtigen.

Durch die entwickelten informationsbedingten Verschwendungsarten und die informationsbezogenen Gestaltungsansätze werden Werkzeuge mit Leitbildcharakter bereitgestellt, die bei der informationsflussorientierten Wertstromanalyse und dem in-



formationsflussorientierten Wertstromdesign verwendet werden. Ziel durch die geschaffene Beschreibung dieser ist es, ein einheitliches Verständnis für die Anwender der Methodik zugrunde zu legen. Allerdings lässt sich eine gewisse Subjektivität bei der Auslegung dieser nicht vollständig vermeiden, da das jeweilige Verständnis zu den Verschwendungsarten und den Gestaltungsansätzen vom Wissen und Erfahrungsschatz der jeweiligen Anwender der Methodik abhängt.

### **8.5 Erfüllung der Anforderungen an die Methodik**

Nachstehend wird eine kritische Reflexion der entwickelten Methodik vorgenommen, in welcher die Erfüllung der Zielsetzung des Forschungsprozesses beurteilt wird. Hierfür werden die in Abschnitt 3.4 aufgeführten forschungsleitenden Anforderungen in Bezug auf Formalisierung, informationsbezogene Gestaltung, Wirkzusammenhänge und Vorgehensweise herangezogen. Anschließend fasst Abbildung 8.2 die Erfüllung der Anforderungen qualitativ zusammen.

**Formalisierung:** Mit der entwickelten Formalisierung lassen sich die Abläufe von Wertströmen unter Berücksichtigung ihrer Informationsflussteilnehmer vollständig abbilden. Hierbei ermöglicht die entwickelte Schematisierung durch ihre modulare Prozessbeschreibung, dass bestehende ebenso wie zukünftige digitale Technologien hinsichtlich ihrer Zusammenhänge mit Prozessen zu Material- und Informationsflüssen untersucht werden können.

**Informationsbezogene Gestaltung:** Unabhängig von dem zu untersuchenden Wertstrom und von den Anwendern können die Zielsetzungen von Informationsfluss und Informationslogistik, die informationsbedingten Verschwendungsarten sowie die informationsbezogenen Gestaltungsansätze als Werkzeuge für die Analyse und Gestaltung von informationsbezogenen Abläufen Verwendung finden.

**Wirkzusammenhänge:** Durch das entwickelte System-Dynamics-Modell können komplexe Wirkzusammenhänge zwischen Bestandteilen von Produktionsprozessketten verschiedener Wertströme unabhängig von der Anzahl ihrer Puffer und Produktionsprozesse beschrieben werden. Aufgrund seines generischen Charakters kann das System-Dynamics-Modell die Auswirkungen veränderter Informationsflüsse in Wertströmen prognostizieren.

**Vorgehensweise:** Die Vorgehensweise unterstützt bei der Analyse und Gestaltung informationsflussorientierter Wertströme sowie bei der Identifikation und Auswahl vorteilhafter Handlungsalternativen. Hierfür können Untersuchungen zu

Integrationszenarien mit einer wertschöpfungsorientierten Einbindung von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien in einem betrachteten Wertstrom durchgeführt werden. Aufgrund der strukturierten und methodisch gestützten Schritte sowie des zeitlich hinnehmbaren Aufwands ihrer Durchführung lässt sich die Vorgehensweise bei Problemstellungen des vorliegenden Problemkontexts für die industrielle Praxis erfolgreich anwenden.

<b>Formalisierung</b>			
Vollständigkeit	●	Modularität und prozessbezogene Eignung	●
Zeitliche Beständigkeit	●		
<b>Informationsbezogene Gestaltung</b>			
Leitbildcharakter	●	Objektivität	●
<b>Wirkzusammenhänge</b>			
Skalierbarkeit	●	Gesamtheitlichkeit	●
Berücksichtigung von Dynamik	●		
<b>Vorgehensweise</b>			
Prozessorientierung	●	Vergleichbarkeit	●
Praxistauglichkeit	●		
<b>Legende:</b> ● erfüllt    ...    ● größtenteils erfüllt			

Abbildung 8.2: Erfüllung der Anforderungen

### 8.6 Fazit

Im vorliegenden Kapitel erfolgte die kritische Würdigung der entwickelten Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme. In diesem Rahmen wurde ein Vorgehen eingeführt, um eine technisch-wirtschaftliche Bewertung der Methodik durchführen zu können. Hierfür können der quantitative Aufwand sowie der quantitative und qualitative Nutzen berücksichtigt werden. Die technisch-wirtschaftliche Bewertung hat in Bezug auf die jeweilige Anwendung zu erfolgen, da unternehmensspezifische Gegebenheiten einer allgemeingültigen Bewertung entgegenstehen. In diesem Zusammenhang erfolgte die beispielhafte technisch-wirtschaftliche Bewertung anhand des Anwendungsbeispiels und der Anwendung der Methodik. Darüber hinaus wurden im Forschungsprozess identifizierte Limitationen der Methodik aufgeführt. Abschließend wurde der Erfüllung der forschungsleitenden Anforderungen beurteilt. Unter Berücksichtigung der technisch-wirtschaftlichen Bewertung, der Limitationen und der Anforderungen lässt sich ein positives Ergebnis bezüglich der entwickelten Methodik resümieren.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

*“Nothing is particularly hard if you divide it into small jobs.”*

– Henry Ford –

### 9.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme entwickelt, um in Bezug auf die Wertströme von Produktionssystemen einen zielgerichteten und wertschöpfenden Einsatz digitaler Technologien zu ermöglichen. Die spezifischen Herausforderungen am Hochlohnstandort Deutschland verlangen von produzierenden Unternehmen, dass diese vor technologischen Fortschritten durch die Digitalisierung nicht zurückweichen dürfen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit durch den Einsatz digitaler Technologien erhalten und ausbauen zu können. Der Blick auf die organisatorischen Strukturen der Produktionsabläufe produzierender Unternehmen zeigt auf, dass hinreichende sowie erforderliche Voraussetzungen aufgrund der wertstromorientierten Ausrichtung der Prozesse des Material- und Informationsflusses durch das Leitbild Ganzheitlicher Produktionssysteme gegeben sind. Allerdings bedarf es der Nutzentransparenz beim Einsatz digitaler Technologien. Hierfür müssen eine ziel- und prozessorientierte Integration dieser methodisch unterstützt sowie die Auswirkungen ihres Einsatzes auf die Wertströme nachvollziehbar sein, bevor Investitionsentscheidungen rational getroffen werden können.

Vor dem Hintergrund der Ausgangssituation, der Motivation und des Problemkontexts wurden im Stand der Forschung Ansätze zur Integration digitaler Technologien, Ansätze zur Modellierung von Wertströmen und spezifische Ansätze der Wertstrommethode erörtert. Es folgte die Ableitung des Handlungsbedarfs hinsichtlich der vier Teilaspekte Formalisierung, informationsbezogene Gestaltung, Wirkzusammenhänge und Vorgehensweise, zu denen forschungsleitende Anforderungen formuliert wurden. In Bezug auf diese vier Teilaspekte wurde eine Methodik bestehend aus dem Strukturmodell und der Vorgehensweise zur Integration digitaler Technologien in den Wertströmen Ganzheitlicher Produktionssysteme entwickelt.

Das Strukturmodell zur Integration digitaler Technologien umfasst die Formalisierung informationsflussorientierter Wertströme, die informationsbezogene Gestaltung von Wertströmen sowie die Modellierung von Wirkzusammenhängen in Wertströ-

men. Im Rahmen der Formalisierung wurde eine Schematisierung von informationsflussorientierten Wertströmen entwickelt. Diese ermöglicht zum einen eine wertstromorientierte Klassifizierung von Informationsflussteilnehmern bzw. digitalen Technologien und zum anderen eine detaillierte Beschreibung von Prozessen des Material- und Informationsflusses unter Berücksichtigung von prozessualen Fähigkeiten und Verantwortlichkeiten zu untersuchender Informationsflussteilnehmer bzw. digitaler Technologien. Anschließend wurden in der informationsbezogenen Gestaltung allgemeine Zielsetzungen von Informationsfluss und Informationslogistik beschrieben. Darauf aufbauend erfolgte die Herleitung von informationsbedingten Verschwendungsarten sowie informationsbezogenen Gestaltungsansätzen, anhand derer die Beurteilung und Gestaltung von Informationsflüssen unterstützt werden. Abschließend wurde ein auf dem System-Dynamics-Ansatz basierendes Modell entwickelt, das die Wirkzusammenhänge von Wertströmen und ihren Produktionsprozessketten mit dynamischem und stochastischem Verhalten aufzeigt. Hierdurch wird Transparenz bezüglich der Auswirkungen informationsbezogener Veränderungen in Wertströmen geschaffen.

Die entwickelte Vorgehensweise stellt aus Anwendungssicht die wesentliche Komponente der Methodik dar. Sie setzt sich aus den drei aufeinander aufbauenden Schritten der informationsflussorientierten Wertstromanalyse, des informationsflussorientierten Wertstromdesigns und der Bewertung der Integration digitaler Technologien zusammen. Durch die informationsflussorientierte Wertstromanalyse können die Prozesse von Material- und Informationsfluss detailliert aufgenommen und den Informationsflussteilnehmern eines betrachteten Wertstroms zugeordnet werden. Auf dieser Grundlage können klassische sowie informationsbedingte Verschwendungen und ihre Ursachen identifiziert werden. Im informationsflussorientierten Wertstromdesign werden anschließend gestaltungsansatzbasierte Maßnahmen generiert und priorisiert, um die identifizierten Verschwendungen und ihre Ursachen zu beheben sowie einen Soll-Wertstrom abzuleiten. Anhand der prozessualen Integration wird darauf aufbauend der Beitrag digitaler Technologien zur Realisierung der Maßnahmen und des Soll-Wertstroms ermittelt. Abschließend werden in der Vorgehensweise die Auswirkungen von Integrationsanpassungen sowie Integrationsneuerungen von den betrachteten digitalen Technologien sowie Informationsflussteilnehmern durch das entwickelte System-Dynamics-Modell prognostiziert. In diesem Rahmen werden anhand der priorisierten Maßnahmen Integrationsszenarien aufgestellt, deren Auswirkungen auf den Wertstrom hinsichtlich der GPS-Zielgrößen Durchlaufzeit, Qualitätsgrad, Produktivitätsgrad und Every Part Every Interval simulativ ermittelt werden. Die Prognosen zu den GPS-Zielgrößen der einzelnen Integrationsszenarien

unterstützen die Auswahl der zugrunde liegenden Maßnahmen, wie und durch welche digitalen Technologien prozessuale Veränderungen am Wertstrom vorzunehmen sind.

Die Anwendung der Methodik erfolgte mit der Durchführung der drei Schritte der entwickelten Vorgehensweise. Anhand eines industriellen Anwendungsbeispiels wurde gezeigt, dass Problemstellungen aus der industriellen Praxis mit der entwickelten Methodik untersucht werden können. Die abschließende kritische Würdigung der Methodik bestätigt den Erfolg der eingangs formulierten Zielsetzung der Entwicklung einer Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme.

## **9.2 Ausblick**

Im Forschungsprozess der vorliegenden Arbeit wurde der Fokus auf die Untersuchung innerbetrieblicher Wertströme von produzierenden Unternehmen gelegt. Die Methodik kann in Unternehmen, die unterschiedliche digitale Reifegrade hinsichtlich ihrer Informationsflüsse aufweisen, durchgeführt werden. Vor diesem Hintergrund lassen sich weitere Untersuchungsbereiche für künftige Forschungsarbeiten ableiten. Drei mögliche Ansätze werden im Folgenden skizziert.

Die Anwendung der vorgestellten Methodik weist bei der Durchführung der Vorgehensweise Projektcharakter auf. Werden Werkzeuge zur Prozessverbesserung projektbezogen in Ganzheitlichen Produktionssystemen eingesetzt, so kann anschließend die Verankerung derartiger Werkzeuge in der Aufbauorganisation erfolgen. In Bezug auf die entwickelte Methodik könnten Wertströme im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses hinsichtlich Wertschöpfungsmaximierung und Verschwendungs-beseitigung stetig weiterentwickelt werden. Weitere Arbeiten könnten folglich erforschen, wie sich die Methodik und insbesondere die entwickelte Vorgehensweise durch das Shopfloor-Management in der Aufbauorganisation produzierender Unternehmen für kontinuierliche Wertstromverbesserungen etablieren lassen und wie unter Berücksichtigung digitaler Technologien das digitale Bewusstsein bei den Mitarbeitern weiter ausgebaut werden kann.

In Bezug auf das Themenfeld des Supply Chain Managements ließen sich neben innerbetrieblichen Wertströmen eines einzelnen Unternehmens auch zwischen- und überbetriebliche Wertströme mehrerer Unternehmen in den Betrachtungen berücksichtigen. In diesem Rahmen könnte das Verhalten einer erweiterten Prozesskette un-

ter Berücksichtigung der Informationsflussteilnehmer mehrerer Unternehmen untersucht werden, um unternehmensübergreifende Wertschöpfungspotenziale realisieren zu können.

In der Vorgehensweise der Methodik wurde explizit darauf geachtet, dass die einzelnen Schritte weitestgehend unabhängig vom digitalen Reifegrad des jeweiligen Unternehmens und seiner Wertströme durchgeführt werden können, um die Relevanz der Methodik für eine größere Bandbreite produzierender Unternehmen zu begünstigen. Liegt jedoch ein erhöhter digitaler Reifegrad betrachteter Wertströme vor, so erscheint eine softwaregestützte Durchführung der Schritte der Vorgehensweise vielversprechend. Hierfür könnten die wissenschaftlichen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit mit Ansätzen des Process Minings, wie sie beispielsweise KLENK (2019), KNOLL ET AL. (2019), URNAUER & METTERNICH (2019) oder ZIEGLER ET AL. (2019) aufzeigen, verbunden werden. Eine softwaregestützte Durchführung erscheint insbesondere vielversprechend, wenn die zu untersuchenden Prozessketten mehrere Prozesse und Teilprozesse aufweisen oder über mehrere Unternehmen einer Supply Chain in Verbindung stehen.

Die skizzierten Untersuchungsbereiche, die auf den Ergebnissen und Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit aufbauen könnten, sind als Vorschlag für weitere Forschungsarbeiten zu verstehen. Vor dem Hintergrund der Herausforderungen, denen produzierende Unternehmen zu begegnen haben, bedarf es der stetigen Weiterentwicklung der Prozesse und Wertströme produzierender Unternehmen. Hierbei soll mit geeigneten Lösungen der Erhalt und der Ausbau ihrer Wettbewerbsfähigkeit sichergestellt werden können.

## Literaturverzeichnis

AAMODT & NYGARD 1995

Aamodt, A.; Nygard, M.: Different roles and mutual dependencies of data, information, and knowledge – An AI perspective on their integration. *Data & Knowledge Engineering* 16 (1995) 3, S. 191-222.

ABDULMALEK & RAJGOPAL 2007

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

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ABELE ET AL. 2011

Abele, E.; Anderl, R.; Brungs, F.; Mosch, C.: Materialflusssimulation in der schlanken Produktion. *Productivity Management* 16 (2011) 5, S. 48-51.

ABELE ET AL. 2012

Abele, E.; Wolff, M.; Manz, A.: Optimierung von Wertströmen. Mit Lean-Methoden und Materialflusssimulation zu operativer Exzellenz. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 107 (2012) 4, S. 212-216.

ABELE ET AL. 2015

Abele, E.; Anderl, R.; Metternich, J.; Arndt, A.; Wank, A.; Anokhin, O.; Meudt, T.; Sauer, M.: *Industrie 4.0 – Potenziale, Nutzen und Good-Practice-Beispiele für die hessische Industrie. Zwischenbericht zum Projekt Effiziente Fabrik 4.0*. Bamberg: Meisenbach 2015. ISBN: 978-3-87525-389-4.

AFFENZELLER ET AL. 2018

Affenzeller, P.; Hartlieb, E.; Willmann, R.: *Industrie 4.0 – Evaluierung für Unternehmen mit physischen Angeboten*. In: Granig, P. et al. (Hrsg.): *Mit Innovationsmanagement zu Industrie 4.0. Grundlagen, Strategien, Erfolgsfaktoren und Praxisbeispiele*. Wiesbaden: Springer Gabler 2018, S. 83-96. ISBN: 978-3-658-11667-5.

ALTENDORFER-KAISER ET AL. 2015

Altendorfer-Kaiser, S.; Kapeller, J.; Judmaier, G.: *Schlanke Informationswirtschaft als Herausforderung der modernen Industrie. Einsatz der Lean-Philosophie zur Identifizierung wertschöpfender Informationen*. *Industrie 4.0 Management* 31 (2015) 2, S. 19-22.

AMBERG ET AL. 2011

Amberg, M.; Bodendorf, F.; Möslin, K. M.: Wertschöpfungsorientierte Wirtschaftsinformatik. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-16756-0.

ANTONELLI & STADNICKA 2018

Antonelli, D.; Stadnicka, D.: Combining factory simulation with value stream mapping: a critical discussion. *Procedia CIRP* 67 (2018), S. 30-35.

ANTONELLI ET AL. 2018

Antonelli, D.; Litwin, P.; Stadnicka, D.: Multiple System Dynamics and Discrete Event Simulation for manufacturing system performance evaluation. *Procedia CIRP* 78 (2018), S. 178-183.

ARNOLD & FURMANS 2019

Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2019. ISBN: 978-3-662-60388-8.

ARROMBA ET AL. 2019

Arromba, A. R.; Teixeira, L.; Xambre, A. R.: Information Flows Improvement in Production Planning using Lean concepts and BPMN. An exploratory study in industrial context. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). New Jersey: Piscataway 2019, S. 206-211. ISBN: 978-989-98434-9-3.

AUGUSTIN 1990

Augustin, S.: Information als Wettbewerbsfaktor. Informationslogistik – Herausforderung an das Management. Zürich: Industrielle Organisation 1990. ISBN: 978-3-85743-949-0.

AULL 2013

Aull, F.: Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden. Dissertation Technische Universität München (2012). München: Herbert Utz 2013. ISBN: 978-3-8316-4283-0.

BALS LIEMKE 2015

Balsliemke, F.: Kostenorientierte Wertstromplanung. Prozessoptimierung in Produktion und Logistik. Wiesbaden: Springer Gabler 2015. ISBN: 978-3-658-08699-2.

BAUER ET AL. 2018

Bauer, H.; Brandl, F.; Lock, C.; Reinhart, G.: Integration of Industrie 4.0 in Lean Manufacturing Learning Factories. *Procedia Manufacturing* 23 (2018), S. 147-152.



## BAUER ET AL. 2019

Bauer, W.; Pokorni, B.; Findeisen, S.: Production Assessment 4.0 – Methods for the Development and Evaluation of Industry 4.0 Use Cases. In: Karwowski, W. et al. (Hrsg.): Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control. Cham: Springer 2019, S. 501-510. ISBN: 978-3-319-94196-7.

## BAUERNHANSL 2017

Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. Allgemeine Grundlagen. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 1-32. ISBN: 978-3-662-53254-6.

## BAUERNHANSL ET AL. 2018

Bauernhansl, T.; Hartleif, S.; Felix, T.: The Digital Shadow of production – A concept for the effective and efficient information supply in dynamic industrial environments. Procedia CIRP 72 (2018), S. 69-74.

## BAYER ET AL. 2020

Bayer, C.; Makhlouf, R.; Metternich, J.: Digitale Assistenzsysteme in der Produktion. Eine Spezifikation der relevanten Funktionen. wt Werkstattstechnik online 110 (2020) 3, S. 103-107.

## BECKER 2018

Becker, T.: Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren. 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2018. ISBN: 978-3-662-49075-4.

## BELLMANN &amp; MEYER 2016

Bellmann, V. K.; Meyer, G.: Prozess- und kompetenzorientierte Methodenauswahl. Zielgerichtete Methodenauswahl in komplexen sozio-technischen Systemen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (2016) 1-2, S. 23-27.

## BELLMANN 2016

Bellmann, V. K.: Schlussbericht prokoMA – Prozess- und kompetenzorientierte Methodenauswahl in produzierenden KMU. Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA). 2016.

## BERGHOLZ 2005

Bergholz, M. A.: Objektorientierte Fabrikplanung. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2005). 2005.

BHAMU & SANGWAN 2014

Bhamu, J.; Sangwan, K. S.: Lean manufacturing: literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management* 34 (2014) 7, S. 876-940.

BICK 2014

Bick, W.: Warum Industrie 4.0 und Lean zwingend zusammengehören. *VDI-Z* 156 (2014) 11, S. 46-47.

BIROLINI 1997

Birolini, A.: *Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen*. Berlin, Heidelberg: Springer 1997. ISBN: 978-3-642-60399-0.

BISCHOFF ET AL. 2015

Bischoff, J.; Taphorn, C.; Wolter, D.; Braun, N.; Fellbaum, M.; Goloverov, A.; Ludwig, S.; Hegmanns, T.; Prasse, C.; Henke, M.; Hompel, M. ten; Döbbeler, F.; Fuss, E.; Kirsch, C.; Mättig, B.; Braun, S.; Guth, M.; Kaspers, M.; Scheffler, D.: *Erschließung der Potenziale der Anwendung von 'Industrie 4.0' im Mittelstand*. Mülheim an der Ruhr: agiplan, Fraunhofer IML, ZENIT 2015.

BITKOM ET AL. 2015

BITKOM; VDMA; ZVEI: *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*. Berlin, Frankfurt am Main. 2015.

BITSCH 2019

Bitsch, G.: *Digitales Shopfloor-Management: Ein adaptives Informations- und Entscheidungsinstrument im Umfeld von Industrie-4.0-Produktionssystemen*. In: Obermaier, R. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen*. Wiesbaden: Springer Gabler 2019, S. 295-316. ISBN: 978-3-658-24576-4.

BLEHER 2014

Bleher, N.: *Produktionssysteme erfolgreich einführen*. Dissertation Universität Hohenheim (2013). Wiesbaden: Springer Gabler 2014. ISBN: 978-3-658-05275-1.

BLEICHER 1991

Bleicher, K.: *Organisation. Strategien – Strukturen – Kulturen*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer 1991. ISBN: 978-3-322-82919-1.

BLOCHING ET AL. 2015

Bloching, B.; Remane, G.; Leutiger, P.; Quick, P.; Oltmanns, T.; Sharfranyuk, O.; Rossbach, C.; Schlick, T.: *The Digital Transformation of Industry. How important*

is it? Who are the winners? What must be done now? München, Berlin: Roland Berger, BDI 2015.

BOCCIARELLI & D'AMBROGIO 2011

Bocciarelli, P.; D'Ambrogio, A.: A BPMN extension for modeling non functional properties of business processes. In: The Society for Modeling and Simulation International (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Symposium on Theory of Modeling & Simulation: DEVS Integrative M&S Symposium (TMS-DEVS). San Diego: Society for Computer Simulation International 2011, S. 160-168.

BODE 1993

Bode, J.: Betriebliche Produktion von Information. Dissertation Universität zu Köln (1993). Wiesbaden: Springer Fachmedien 1993. ISBN: 978-3-663-14666-7.

BOGNER ET AL. 2016

Bogner, E.; Voelklein, T.; Schroedel, O.; Franke, J.: Study Based Analysis on the Current Digitalization Degree in the Manufacturing Industry in Germany. Procedia CIRP 57 (2016), S. 14-19.

BRADL 2004

Bradl, P.: Einsatz von System Dynamics in der strategischen Unternehmensplanung. Prototypische Implementierung unter besonderer Berücksichtigung der Erfordernisse von Zu- und Abgangssystemen. Dissertation Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2004). 2004.

BRAUN & ESSWEIN 2014A

Braun, R.; Esswein, W.: Classification of Domain-Specific BPMN Extensions. International Federation for Information Processing (IFIP) 197 (2014), S. 42-57.

BRAUN & ESSWEIN 2014B

Braun, R.; Esswein, W.: Extending BPMN for modeling resource aspects in the domain of machine tools. WIT Transactions on Engineering Sciences 87 (2014), S. 450-458.

BRENNER 2016

Brenner, J.: Lean Production. Praktische Umsetzung zur Erhöhung der Wertschöpfung. 2. Auflage. München: Carl Hanser 2016. ISBN: 978-3-446-45066-0.

CHEN ET AL. 2010

Chen, J. C.; Li, Y.; Shady, B. D.: From value stream mapping toward a lean/sigma continuous improvement process: an industrial case study. International Journal of Production Research 48 (2010) 4, S. 1069-1086.

CONRAD & AUSILIO 2016

Conrad, R.; Ausilio, G.: Wertstrommanagement. In: Institut für angewandte Arbeitswissenschaft (ifaa) (Hrsg.): 5S als Basis des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016, S. 69-76. ISBN: 978-3-662-48552-1.

COYLE 1996

Coyle, R. G.: System Dynamics Modelling. A practical approach. London: Chapman & Hall 1996. ISBN: 0-412-61710-2.

DAIS 2017

Dais, S.: Industrie 4.0 – Anstoß, Vision, Vorgehen. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. Allgemeine Grundlagen. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 259-268. ISBN: 978-3-662-53254-6.

DAL FORNO ET AL. 2014

Dal Forno, A. J.; Pereira, F. A.; Focellini, F. A.; Kipper, L. M.: Value Stream Mapping: a study about the problems and challenges found in the literature from the past 15 years about application of Lean tools. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 72 (2014), S. 779-790.

DANGELMAIER 2009

Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-642-00633-3.

DAVENPORT & HARRIS 2017

Davenport, T. H.; Harris, J. G.: Competing on Analytics: The New Science of Winning. Boston: Harvard Business Review Press 2017. ISBN: 978-1-63369-373-9.

DECKER & PUHLMANN 2007

Decker, G.; Puhlmann, F.: Extending BPMN for Modeling Complex Choreographies. In: Meersman, R.; Tari, Z. (Hrsg.): On the Move to Meaningful Internet Systems 2007. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2007, S. 24-40. ISBN: 978-3-540-76846-3.

DELOITTE 2016

Deloitte: Manufacturing 4.0: Meilenstein, Must-Have oder Millionengrab? Warum bei M4.0 die Integration den entscheidenden Unterschied macht. München. 2016.

DEUSE & BUSCH 2012

Deuse, J.; Busch, F.: Zeitwirtschaft in der Montage. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2.

Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 79-108. ISBN: 978-3-642-29061-9.

DIEKMANN 2017

Diekmann, J.: Wie verändern Ganzheitliche Produktionssysteme das verarbeitende Gewerbe? Dissertation Technische Universität Darmstadt (2017). 2017.

DIN 8580

DIN Deutsches Institut für Normung: DIN 8580: Fertigungsverfahren. Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.

DIN EN 62264-1

DIN Deutsches Institut für Normung: DIN EN 62264-1: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen. Teil 1: Modelle und Terminologie. Berlin: Beuth 2014.

DIN EN ISO 9000

DIN Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2015.

DIN EN ISO 9241-1

DIN Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 9241-1: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten. Teil 1: Allgemeine Einführung. Berlin: Beuth 2002.

DIN EN ISO 9241-110

DIN Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 9241-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Teil 110: Interaktionsprinzipien (Entwurf). Berlin: Beuth 2019.

DIN IEC 60050-351

DIN Deutsches Institut für Normung: DIN IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch. Teil 351: Leittechnik. Berlin: Beuth 2014.

DITTRICH 2008

Dittrich, I.: Ein Beitrag zur Optimierung der Informationslogistik im Ersatzteilwesen der Automobilindustrie. Dissertation Technische Universität Kaiserslautern (2008). 2008.

DOMBROWSKI & MIELKE 2015A

Dombrowski, U.; Mielke, T.: Einleitung und historische Entwicklung. In: Dombrowski, U.; Mielke, T. (Hrsg.): Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015, S. 1-24. ISBN: 978-3-662-46164-8.

DOMBROWSKI & MIELKE 2015B

Dombrowski, U.; Mielke, T.: Gestaltungsprinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme. In: Dombrowski, U.; Mielke, T. (Hrsg.): Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015, S. 25-169. ISBN: 978-3-662-46164-8.

DOMBROWSKI & RICHTER 2016

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

DOMBROWSKI ET AL. 2005

Dombrowski, U.; Hennersdorf, S.; Schmidt, S.: Kennzahlen im ganzheitlichen Produktionssystem. Ein Beispiel zur Auswahl, Abstimmung und Verwendung von Kennzahlen im Rahmen eines ganzheitlichen Produktionssystems. PPS Management 10 (2005) 4, S. 19-23.

DOMBROWSKI ET AL. 2015

Dombrowski, U.; Richter, T.; Ebentreich, D.: Auf dem Weg in die vierte industrielle Revolution. Ganzheitliche Produktionssysteme zur Gestaltung der Industrie 4.0-Architektur. zfo 84 (2015) 3, S. 157-163.

DOMBROWSKI ET AL. 2016

Dombrowski, U.; Ebentreich, D.; Krenkel, P.: Impact analyses of lean production systems. Procedia CIRP 57 (2016), S. 607-612.

DOMBROWSKI ET AL. 2017A

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

DOMBROWSKI ET AL. 2017B

Dombrowski, U.; Richter, T.; Krenkel, P.: Wechselwirkungen von Ganzheitlichen Produktionssystemen und Industrie 4.0. Eine Use-Case Analyse. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) 6, S. 430-433.

DOMBROWSKI ET AL. 2018A

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

DOMBROWSKI ET AL. 2018B

Dombrowski, U.; Krenkel, P.; Hermann, M.: Ganzheitliches Informationsmanagement im Kontext von Industrie 4.0. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018) 12, S. 869-872.

DÖRNHÖFER 2016

Dörnhöfer, M.: Entwicklung eines modularen Kennzahlensystems für die Automobillogistik im Kontext der schlanken Logistik. Dissertation Technische Universität München (2016). 2016.

DREWS ET AL. 2016

Drews, T.; Molenda, P.; Oechsle, O.; Steinhilper, R.: Value-focused design of lean production systems based on a system dynamics approach. Procedia CIRP 50 (2016), S. 478-483.

DROSTE ET AL. 2015

Droste, M.; Hasselmann, V.-R.; Lenzian, H.: Fließprinzip. In: Dombrowski, U.; Mielke, T. (Hrsg.): Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015, S. 96-109. ISBN: 978-3-662-46164-8.

DUDEN 2017

Duden: Die deutsche Rechtschreibung. Auf der Grundlage der aktuellen amtlichen Rechtschreibregeln. 27. Auflage. Berlin: Dudenverlag 2017. ISBN: 978-3-411-04017-9.

DURCHHOLZ 2013

Durchholz, J.: Wertstromdesign für die Logistik – ein Planungsleitfaden. In: Günthner, W. A.; Boppert, J. (Hrsg.): Lean Logistics. Methodisches Vorgehen und praktische Anwendung in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013, S. 145-162. ISBN: 978-3-642-37326-8.

DYCKHOFF 2003

Dyckhoff, H.: Grundzüge der Produktionswirtschaft. Einführung in die Theorie betrieblicher Wertschöpfung. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 978-3-662-07620-0.

EISELE 2018

Eisele, M.: Ein Verfahren zur Planung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen. Dissertation Universität Stuttgart (2018). Stuttgart: Fraunhofer 2018. ISBN: 978-3-8396-1376-4.

EISENFÜHR & WEBER 2003

Eisenführ, F.; Weber, M.: Rationales Entscheiden. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 978-3-662-09668-0.

ENGELMANN & GROßMANN 2018

Engelmann, F.; Großmann, C.: Was wissen wir über Information? In: Hildebrand, K. et al. (Hrsg.): Daten- und Informationsqualität. Auf dem Weg zur Information Excellence. Wiesbaden: Springer Vieweg 2018, S. 3-22. ISBN: 978-3-658-21994-9.

ENKE ET AL. 2017

Enke, J.; Meister, M.; Metternich, J.; Genne, M.; Brosche, J.: Der Weg zur Lean Quality 4.0. Weiterentwicklung der Qualitätsinstrumente schlanker Produktionssysteme durch Industrie 4.0. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) 9, S. 612-615.

ERLACH & WESTKÄMPER 2009

Erlach, K.; Westkämper, E. (Hrsg.): Energiewertstrom. Der Weg zur energieeffizienten Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer 2009. ISBN: 978-3-839-60010-8.

ERLACH 2010

Erlach, K.: Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-540-89867-2.

ERLACH ET AL. 2020

Erlach, K.; Böhm, M.; Hartleif, S.; Leipoldt, C.; Ungern-Sternberg, R.: Gestaltungsrichtlinien in den Technikwissenschaften. Eine wissenschaftstheoretische Betrachtung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (2020) 1-2, S. 77-81.

EVERSHEIM 1989

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 4. Fertigung und Montage. Düsseldorf: VDI 1989. ISBN: 978-3-642-61344-9.

FISCHER & SCHEIBELER 2003

Fischer, F.; Scheibeler, A. A.: Handbuch Prozessmanagement. Effizienzsteigerung mit ISO 9001+9004; 1000 Beispiele aus der Praxis. München: Carl Hanser 2003. ISBN: 3-446-21925-0.

FLEISCHMANN ET AL. 2018

Fleischmann, A.; Oppl, S.; Schmidt, W.; Stary, C.: Ganzheitliche Digitalisierung von Prozessen. Perspektivenwechsel – Design Thinking – Wertegeleitete Interaktion. Wiesbaden: Springer Vieweg 2018. ISBN: 978-3-658-22648-0.



FOCKE & STEINBECK 2018

Focke, M.; Steinbeck, J.: Steigerung der Anlagenproduktivität durch OEE-Management. Definitionen, Vorgehen und Methoden – von manuell bis Industrie 4.0. Wiesbaden: Springer Gabler 2018. ISBN: 978-3-658-21456-2.

FORRESTER 1969

Forrester, J. W.: Industrial Dynamics. MIT Press: Cambridge 1969.

FREUND & RÜCKER 2019

Freund, J.; Rücker, B.: Praxishandbuch BPMN. Mit Einführung in DMN. 6. Auflage. München: Carl Hanser 2019. ISBN: 978-3-446-46112-3.

FRIEDLAND 2018

Friedland, R.: Potenziale der Digitalisierung in Logistik und Produktion. Frankfurt am Main: Miebach Consulting 2018.

FRISCHKE 2006

Frischke, S.: Simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung bei der Gestaltung flexibler Produktionsbereiche auf taktischer Ebene. Dissertation Brandenburgische Technische Universität Cottbus (2006). 2006.

FUCHS-KITTOWSKI 2001

Fuchs-Kittowski, K.: Wissens-Ko-Produktion – Organisationsinformatik. In: Fuchs-Kittowski, K. et al. (Hrsg.): Organisationsinformatik und Digitale Bibliothek in der Wissenschaft. Berlin: Gesellschaft für Wissenschaftsforschung 2001, S. 9-88. ISBN: 3-934682-34-0.

FURRER 2017

Furrer, F. J.: Software. Gratwanderung zwischen Erfolgen und Katastrophen? Informatik Spektrum; 40 (2017) 3, S. 264-269.

GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON 2019

Gabler Wirtschaftslexikon: Gabler Wirtschaftslexikon. 19. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2019. ISBN: 978-3-658-19570-0.

GADATSCH 2017

Gadatsch, A.: Grundkurs Geschäftsprozessmanagement. Analyse, Modellierung, Optimierung und Controlling von Prozessen. 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017. ISBN: 978-3-658-17179-7.

GANSCHAR ET AL. 2013

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

GARTZEN 2012

Gartzen, T.: Diskrete Migration als Anlaufstrategie für Montagesysteme. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2012). Aachen: Apprimus 2012. ISBN: 978-3-86359-100-7.

GASCH ET AL. 2009

Gasch, A.; Gerlach, M.; Kaiser, U.; Kloska, M.; Maiwald, M.; Matalla, N.; Morr, W.; Panzke, R.; Stieler, S.; Westerkamp, D.: Prozess-Sensoren 2015+. Technologie-Roadmap für Prozess-Sensoren in der chemisch-pharmazeutischen Industrie. Düsseldorf, Leverkusen: VDI, NAMUR 2009.

GASSMANN ET AL. 2018

Gassmann, O.; Wecht, C. H.; Winterhalter, S.: Strategisches Technologiemanagement für die Industrie 4.0. In: Granig, P. et al. (Hrsg.): Mit Innovationsmanagement zu Industrie 4.0. Grundlagen, Strategien, Erfolgsfaktoren und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Springer Gabler 2018, S. 15-28. ISBN: 978-3-658-11667-5.

GEISBERGER & BROY 2012

Geisberger, E.; Broy, M.: agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-29099-2.

GESSERT ET AL. 2019

Gessert, S.; Hartleif, S.; Schmidhäuser, P.; Jelschow, V.: Potenziale der Informationswirtschaft. Methode zur transparenten Darstellung und Identifikation. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 12, S. 859-862.

GLADEN 2003

Gladen, W.: Kennzahlen- und Berichtssysteme. Grundlagen zum Performance Measurement. 2. Auflage. Wiesbaden: Gabler 2003. ISBN: 978-3-322-93125-2.

GLONEGGER 2014

Glongegger, M.: Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen. Dissertation Technische Universität München (2014). 2014.

GOCHERMANN 2020

Gochermann, J.: Technologiemanagement. Technologien erkennen, bewerten und erfolgreich einsetzen. Wiesbaden: Springer Gabler 2020. ISBN: 978-3-658-28799-3.

GOLDSTEIN 1999

Goldstein, B.: Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung. Dissertation Technische Universität München (1999). München: Herbert Utz 1999. ISBN: 3-89675-546-3.

GORECKY ET AL. 2014

Gorecky, D.; Schmitt, M.; Loskyll, M.: Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014, S. 525-542. ISBN: 978-3-658-04682-8.

GOTTMANN 2016

Gottmann, J.: Produktionscontrolling. Wertströme und Kosten optimieren. Wiesbaden: Springer Gabler 2016. ISBN: 978-3-658-01951-8.

GOTTMANN ET AL. 2013

Gottmann, J.; Pfeffer, M.; Sihn, W.: Process oriented production evaluation. *Procedia CIRP* 12 (2013), S. 336-341.

GÖTZE 2014

Götze, U.: Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2014. ISBN: 978-3-642-54622-8.

GREINACHER ET AL. 2020

Greinacher, S.; Overbeck, L.; Kuhnle, A.; Krahe, C.; Lanza, G.: Multi-objective optimization of lean and resource efficient manufacturing systems. *Production Engineering* 14 (2020), S. 165-176.

GRIGORYEV 2018

Grigoryev, I.: AnyLogic in three days. A quick course in simulation modeling. 5. Auflage: Ilya Grigoryev 2018.

GRONAU ET AL. 2019

Gronau, N.; Kern, E.-M.; Jonitz, H.: Herausforderungen im Umgang mit Produktionsstörungen. Ergebnisse einer Umfrage zum aktuellen Stand des Störungsmanagements. *Industrie 4.0 Management* 35 (2019) 6, S. 33-36.

GRÖBLER 2008

Größler, A.: System Dynamics zur Strategiesimulation im Produktionsmanagement. In: Specht, D. (Hrsg.): Strategische Bedeutung der Produktion. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2008, S. 73-88. ISBN: 978-3-8350-0932-5.

GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 3-540-43832-7-5.

GÜNTHNER ET AL. 2014

Günthner, W. A.; Klenk, E.; Tenerowicz-Wirth, P.: Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014, S. 297-324. ISBN: 978-3-658-04682-8.

GUTENBERG 1970

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Erster Band. Die Produktion. 17. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1970. ISBN: 978-3-662-11912-9.

HAMBACH 2019

Hambach, J.: Methodik für einen digitalen Verbesserungsprozess im betrieblichen KVP – Entwicklung und problemorientierte Validierung. Dissertation Technische Universität Darmstadt (2019). 2019.

HÄMMERLE & RALLY 2010

Hämmerle, M.; Rally, P.: Wertschöpfung steigern. Ergebnisse der Datenerhebung über die Verbreitung und Ausgestaltung von Methoden zur Prozessoptimierung in der Produktion mit besonderem Fokus auf die Wertstrommethode. Stuttgart: Fraunhofer 2010. ISBN: 978-3-8396-0119-8.

HANSCHKE 2018

Hanschke, I.: Digitalisierung und Industrie 4.0 – einfach und effektiv. Systematisch und lean die digitale Transformation meistern. München: Carl Hanser 2018. ISBN: 978-3-446-45299-2.

HANSMANN 2003

Hansmann, H.: Modellierung von Prozessen und Workflows in der Produktion. In: Becker, J.; Luczak, H. (Hrsg.): Workflowmanagement in der Produktionsplanung und -steuerung. Qualität und Effizienz in der Auftragsabwicklung steigern. Berlin, Heidelberg: Springer 2003, S. 143-161. ISBN: 978-3-642-55501-5.

HARTLEIF ET AL. 2017

Hartleif, S.; Bauernhansl, T.; Erlach, K.: Schlanke Informationslogistik. Konzept für ein nachfragegesteuertes Informationslogistiksystem. Industrie 4.0 Management 33 (2017) 3, S. 45-48.

HARTLIEB ET AL. 2018

Hartlieb, E.; Kandolf, T.; Kanzian, R.; Roth, M.: Aufbau von Innovationskooperationen im Kontext von Industrie 4.0 und IoT. In: Granig, P. et al. (Hrsg.): Mit Innovationsmanagement zu Industrie 4.0. Grundlagen, Strategien, Erfolgsfaktoren und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Springer Gabler 2018, S. 1-14. ISBN: 978-3-658-11667-5.

HARTMANN ET AL. 2018A

Hartmann, L.; Meudt, T.; Seifermann, S.; Metternich, J.: Value stream method 4.0: holistic method to analyse and design value streams in the digital age. *Procedia CIRP* 78 (2018), S. 249-254.

HARTMANN ET AL. 2018B

Hartmann, L.; Meudt, T.; Seifermann, S.; Metternich, J.: Wertstromdesign 4.0. Gestaltung schlanker Wertströme im Zeitalter von Digitalisierung und Industrie 4.0. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (2018) 6, S. 393-397.

HENTSCHEL & LEYH 2016

Hentschel, R.; Leyh, C.: Cloud Computing: Gestern, heute, morgen. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 53 (2016) 5, S. 563-579.

HICKS 2007

Hicks, B. J.: Lean information management: Understanding and eliminating waste. *International Journal of Information Management* 27 (2007) 4, S. 233-249.

HIRSCH-KREINSEN 2015

Hirsch-Kreinsen, H.: Einleitung: Digitalisierung industrieller Arbeit. In: Hirsch-Kreinsen, H. et al. (Hrsg.): Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen. Baden-Baden: Nomos 2015, S. 9-30. ISBN: 978-3-8452-6320-5.

HOELLTHALER ET AL. 2019A

Hoellthaler, G.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Requirements for a methodology for the assessment and selection of technologies of digitalization for lean production systems. *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 198-203.

HOELLTHALER ET AL. 2019B

Hoellthaler, G.; Weissenborn, S.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Method for the Identification of Potentials in Lean Production Systems as Basis for the Selection of Digitalization Technologies. *Proceedings of the International Conference on Competitive Manufacturing (COMA)* (2019), S. 509-514.

HOELLTHALER ET AL. 2020

Hoellthaler, G.; Meister, F.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Function framework for describing digital technologies in the context of lean production. *Procedia CIRP* 88 (2020), S. 167-172.

HOFFMANN & HEIMES 2018

Hoffmann, J.; Heimes, P.: Informationssystem-Architekturen produzierender Unternehmen für die Digitalisierung gestalten. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 55 (2018), S. 984-1005.

HOFMANN 2020

Hofmann, M.: Prozessoptimierung als ganzheitlicher Ansatz. Mit konkreten Praxisbeispielen für effiziente Arbeitsabläufe. Wiesbaden: Springer Gabler 2020. ISBN: 978-3-658-26626-4.

HU ET AL. 2014

Hu, H.; Wen, Y.; Chua, T.-S.; Li, X.: Toward Scalable Systems for Big Data Analytics: A Technology Tutorial. *IEEE* (2014) 2, S. 652-687.

IFAA 2016

ifaa: Digitalisierung & Industrie 4.0. So individuell wie der Bedarf – Produktivitätszuwachs durch Informationen. Düsseldorf: Institut für angewandte Arbeitswissenschaft (ifaa) 2016.

INTRA & ZAHN 2014

Intra, C.; Zahn, T.: Transformation-Waves – A Brick for a Powerful and Holistic Continuous Improvement Process of a Lean Production System. *Procedia CIRP* 17 (2014), S. 582-587.

JACOB 2019

Jacob, D.: Shaping future production landscapes. Weichenstellung für die Produktionswelt von morgen: KUKA 2019.

JACOBI & LANDHERR 2013

Jacobi, H.-F.; Landherr, M.: Bedeutung des Treibers Informations- und Kommunikationstechnik für die Wettbewerbsfähigkeit industrieller Produktion. In: Westkämper, E. et al. (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013, S. 41-44. ISBN: 978-3-642-20259-9.

JODLBAUER 2018

Jodlbauer, H.: *Digitale Transformation der Wertschöpfung*. Stuttgart: Kohlhammer 2018. ISBN: 978-3-17-034103-6.

## JONDRAL 2013

Jondral, A. G.: Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes. Dissertation Karlsruher Institut für Technologie (2013). Aachen: Shaker 2013. ISBN: 978-3-8440-1804-2.

## JOPPEN ET AL. 2019A

Joppen, R.; Kühn, A.; Hupach, D.; Dumitrescu, R.: Collecting data in the assessment of investments within production. *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 466-471.

## JOPPEN ET AL. 2019B

Joppen, R.; Lipsmeier, A.; Tewes, C.; Kühn, A.; Dumitrescu, R.: Evaluation of investments in the digitalization of a production. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 411-416.

## JÜNEMANN &amp; BEYER 1998

Jünemann, R.; Beyer, A.: Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen. Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1998. ISBN: 978-3-642-72225-7.

## JÜNEMANN 1994

Jünemann, R.: Konzepte für den Materialfluß in der Fabrik. In: Kunerth, W. (Hrsg.): Menschen Maschinen Märkte. Die Zukunft unserer Industrie sichern. Berlin, Heidelberg: Springer 1994, S. 167-191. ISBN: 978-3-642-93556-5.

## KAGERMANN 2017

Kagermann, H.: Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. Allgemeine Grundlagen. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 235-247. ISBN: 978-3-662-53254-6.

## KAGERMANN ET AL. 2013

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (Hrsg.): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Berlin, München: Forschungsunion, acatech 2013.

## KAGERMANN ET AL. 2016

Kagermann, H.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; Schuh, G.; Wahlster, W. (Hrsg.): Industrie 4.0 im globalen Kontext. Strategien der Zusammenarbeit mit internationalen Partnern. München: Herbert Utz 2016.

## KAISER ET AL. 2019A

Kaiser, J.; Urnauer, C.; Metternich, J.: A framework for planning logistical alternatives in value stream design. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 180-185.

KAISER ET AL. 2019B

Kaiser, J.; Urnauer, C.; Reif, M.; Metternich, J.: Wertstrombasierte Erstellung von Simulationsmodellen. Umsetzung dynamischer Wertstromsimulation durch ein Baukastensystem. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 11, S. 715-719.

KAMISKE & BRAUER 2011

Kamiske, G. F.; Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A bis Z. Wichtige Begriffe des Qualitätsmanagements und ihre Bedeutung. 7. Auflage. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42812-6.

KARIM & ARIF-UZ-ZAMAN 2013

Karim, A.; Arif-Uz-Zaman, K.: A methodology for effective implementation of lean strategies and its performance evaluation in manufacturing organizations. Business Process Management Journal 19 (2013) 1, S. 169-196.

KAUFMANN & FORSTNER 2017

Kaufmann, T.; Forstner, L.: Die horizontale Integration der Wertschöpfungskette in der Halbleiterindustrie – Chancen und Herausforderungen. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. Allgemeine Grundlagen. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 125-133. ISBN: 978-3-662-53254-6.

KELLER ET AL. 2019

Keller, T.; Bayer, C.; Bausch, P.; Metternich, J.: Benefit evaluation of digital assistance systems for assembly workstations. Procedia CIRP 81 (2019), S. 441-446.

KHAN & YU 2019

Khan, S. A.; Yu, Z.: Strategic Supply Chain Management. Cham: Springer 2019. ISBN: 978-3-030-15058-7.

KIRCHNER 2020

Kirchner, S.: Digitale Arbeitsplätze. In: Friese, H. et al. (Hrsg.): Handbuch Soziale Praktiken und Digitale Arbeitswelten. Wiesbaden: Springer VS 2020, S. 159-168. ISBN: 978-3-658-08357-1.

KLENK 2019

Klenk, E.: Konzept zur systemdatenbasierten Wertstromanalyse. Generierung von Wertströmen mittels Process Mining. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 9, S. 513-516.

KLETTI & SCHUMACHER 2014

Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence



durch Short Interval Technology (SIT). 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-662-4544-1.

KLEVERS 2009

Klevers, T.: Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design. Verschwendung erkennen – Wertschöpfung steigern. München: mi-Fachverlag 2009. ISBN: 978-3-636-03097-9.

KNOLL ET AL. 2019

Knoll, D.; Reinhart, G.; Prüglmeier, M.: Enabling value stream mapping for internal logistics using multidimensional process mining. *Expert Systems with Applications* 124 (2019), S. 130-142.

KNOSPE ET AL. 2018

Knospe, O.; Drewel, M.; Mittag, T.; Pierenkemper, C.; Hobscheidt, D.: Leistungssteigerung durch Industrie 4.0 für kleine und mittlere Unternehmen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (2018) 1-2, S. 83-87.

KNÖSSL 2013

Knössl, T.: Logistikatorientierte Wertstromanalyse. In: Günthner, W. A.; Boppert, J. (Hrsg.): *Lean Logistics. Methodisches Vorgehen und praktische Anwendung in der Automobilindustrie*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013, S. 135-144. ISBN: 978-3-642-37326-8.

KOLBERG & ZÜHLKE 2015

Kolberg, D.; Zühlke, D.: Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. *IFAC-PapersOnLine* 48 (2015) 3, S. 1870-1875.

KOLBERG 2018

Kolberg, D.: Entwicklung einer Referenzarchitektur zur Realisierung von Methoden der Lean Production mittels digitaler Technologien. Dissertation Technische Universität Kaiserslautern (2018). 2018.

KOLBERG ET AL. 2017A

Kolberg, D.; Knobloch, J.; Zühlke, D.: Towards a lean automation interface for workstations. *International Journal of Production Research* 55 (2017) 10, S. 2845-2856.

KOLBERG ET AL. 2017B

Kolberg, D.; Marseu, E.; Gorecky, D.; Koch, J.; Plehn, C.; Zühlke, D.; Reinhart, G.: Strategien zur Transformation der Produktionsumgebung. In: Reinhart, G. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser 2017, S. 213-256. ISBN: 978-3-446-44989-3.

KORGE & LENTES 2009

Korge, A.; Lenten, H.-P.: Ganzheitliche Produktionssysteme. In: Bullinger, H.-J. et al. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2009, S. 569-574. ISBN: 978-3-540-87595-6.

KORNE ET AL. 2019

Korne, T.; Loewenkamp, F.; Luckscheiter, H.: Beurteilung von Produktivitätspotenzialen. Eignung von theoretischen Modellen zur Produktivitätssteigerung in der betrieblichen Praxis. *wt Werkstattstechnik online* 109 (2019) 7/8, S. 543-549.

KOŠTURIK & GREGOR 1995

Košturiak, J.; Gregor, M.: Simulation von Produktionssystemen. Wien: Springer 1995. ISBN: 978-3-7091-9413-3.

KRAFCIK 1988

Krafcik, J. F.: Triumph of the Lean Production System. *MIT Sloan Management Review* 30 (1988) 1, S. 41-52.

KRÄMER 2002

Krämer, K.: Automatisierung in Materialfluss und Logistik. Ebenen, Informationslogistik, Identifikationssysteme, intelligente Geräte. Habilitationsschrift Universität Dortmund (2000). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2002. ISBN: 978-3-322-81221-6.

KRAUSE & GEBHARDT 2018

Krause, D.; Gebhardt, N.: Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien. Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln. Berlin: Springer Vieweg 2018. ISBN: 978-3-662-53040-5.

KRAUSE & PELLENS 2018

Krause, S.; Pellens, B.: Vom „Krähe-Kreis“ bis heute – 75 Jahre Arbeitskreise der Schmalenbach-Gesellschaft. In: Krause, S.; Pellens, B. (Hrsg.): Betriebswirtschaftliche Implikationen der digitalen Transformation. Wiesbaden: Springer Gabler 2018, S. V-XIII. ISBN: 978-3-658-18751-4.

KRCMAR 2015A

Krcmar, H.: Einführung in das Informationsmanagement. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2015. ISBN: 978-3-662-44329-3.

KRCMAR 2015B

Krcmar, H.: Informationsmanagement. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2015. ISBN: 978-3-662-45863-1.

## KROPIK 2009

Kropik, M.: Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-88991-5.

## KRÜGER ET AL. 2017

Krüger, J.; Vick, A.; Chemnitz, M.; Rosenstrauch, M.; Hügler, J.; Fechteler, M.; Blankenburg, M.: Daten, Information und Wissen in Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. 89-110. ISBN: 978-3-446-44989-3.

## KRUPPE 2007

Kruppe, E.: Prozessgestaltung – Grundlage und Mittel des Supply Chain Event Management. In: Ijioui, R. et al. (Hrsg.): Supply Chain Event Management. Konzepte, Prozesse, Erfolgsfaktoren und Praxisbeispiele. Berlin, Heidelberg: Physica-Verlag 2007, S. 141-155. ISBN: 978-3-7908-1739-3.

## KUTTLER 2008

Kuttler, R.: Entwicklung einer gesamtheitlichen Methodik zur kennzahlgestützten Analyse und zielorientierten Optimierung der Informationslogistik in kleinen und mittelständischen Unternehmen. Dissertation Universität Hamburg (2008). 2008.

## LANGLOTZ &amp; AURICH 2019

Langlotz, P.; Aurich, J. C.: Systematical Combination of a Lean Production System and Industry 4.0 Development of a method library to assess interactions. In: Wulfberg, J. P. et al. (Hrsg.): Production at the leading edge of technology. Proceedings WGP. Berlin: Springer 2019, S. 573-582. ISBN: 978-3-662-60417-5.

## LAUX ET AL. 2014

Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: Entscheidungstheorie. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2014. ISBN: 978-3-642-55258-8.

## LAW 2009

Law, A. M.: How to build valid and credible simulation models. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference IEEE (2009), S. 24-33.

## LEE 2014

Lee, Y.-U.: Wertstromdesign als Instrument der wertorientierten Unternehmensführung. Dissertation HHL Leipzig Graduate School of Management (2014). 2014.

## LEWIN ET AL. 2017

Lewin, M.; Wallenborn, M.; Küstner, D.; Erdelmeier, D.; Fay, A.: Auf dem Weg zu innovativen Assistenzsystemen – Systematische Klassifizierung für die Praxis.

In: Begleitforschung Mittelstand-Digital WIK (Hrsg.): Wissenschaft trifft Praxis. Digitale Produktionsmittel im Einsatz 2017, S. 11-17.

LEWIN ET AL. 2019

Lewin, M.; Busert, T.; El Sakka, F.; Voigtländer, S.; Fay, A.: Mit Wertstromdesign Industrie 4.0 gestalten. Erweiterte Wertstrommethode. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität 2019.

LICHTBLAU ET AL. 2015

Lichtblau, K.; Stich, V.; Bertenrath, R.; Blum, M.; Bleider, M.; Millack, A.; Schmitt, K.; Schmitz, E.; Schröter, M.: Industrie 4.0-Readiness. Aachen, Köln: VDMA 2015.

LIEBRECHT ET AL. 2017

Liebrecht, C.; Jacob, A.; Kuhnle, A.; Lanza, G.: Multi-Criteria Evaluation of Manufacturing Systems 4.0 under Uncertainty. *Procedia CIRP* 63 (2017), S. 224-229.

LIPSMEIER ET AL. 2018

Lipsmeier, A.; Bansmann, M.; Roeltgen, D.; Kuerpick, C.: Framework for the identification and demand-oriented classification of digital technologies. *International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD) IEEE* (2018), S. 31-36.

LOCK & REINHART 2016

Lock, C.; Reinhart, G.: A Meta-Model for Analyzing the Influence of Production-Related Business Processes. *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 79-84.

LOCK 2019

Lock, C.: Methodik zur Bewertung des Einflusses produktionsnaher Geschäftsprozesse auf den Produktionsprozess. Dissertation Technische Universität München (2019). 2019.

LUGERT & WINKLER 2017

Lugert, A.; Winkler, H.: Von der Wertstromanalyse zum Wertstrommanagement. Wie die statische Lean-Methode mit Industrie-4.0-Lösungen zu einem dynamischen Managementansatz weiterentwickelt werden kann. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (2017) 4, S. 261-265.

LUGERT & WINKLER 2019A

Lugert, A.; Winkler, H.: Wertstrom – Wertstrommethode – Wertstrommanagement. Wie der Wertstrom systematisch definiert, analysiert und optimiert werden kann und welche Vorteile Wertstrommanagement bietet. *WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 48 (2019) 6, S. 4-11.

LUGERT & WINKLER 2019B

Lugert, A.; Winkler, H.: Zukunftsfähigkeit der Wertstrommethode im Kontext von Industrie 4.0. *Logistics Journal* (2019), S. 1-10.

LUGERT 2019

Lugert, A.: *Dynamisches Wertstrommanagement im Kontext von Industrie 4.0*. Berlin: Logos 2019. ISBN: 978-3-832-54849-0.

LUGERT ET AL. 2018

Lugert, A.; Batz, A.; Winkler, H.: Empirical assessment of the future adequacy of value stream mapping in manufacturing industries. *Journal of Manufacturing Technology Management* 29 (2018) 5, S. 886-906.

MAGENHEIMER 2014

Magenheimer, K. A.: *Lean Management in indirekten Unternehmensbereichen: Modellierung, Analyse und Bewertung von Verschwendung*. Dissertation Technische Universität München (2014). 2014.

MAGENHEIMER ET AL. 2014

Magenheimer, K. A.; Reinhart, G.; Schutte, C. S.: Lean management in indirect business areas: modeling, analysis, and evaluation of waste. *Production Engineering Research and Development* 8 (2014) 1-2, S. 143-152.

MARTTONEN-AROLA & BAGLEE 2019

Marttonen-Arola, S.; Baglee, D.: Assessing the information waste in maintenance management processes. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 26 (2019) 3, S. 383-398.

MATZLER ET AL. 2018

Matzler, K.; Eichen, S. F. von den; Anschober, M.: *Digitale Disruption verstehen, entwickeln und umsetzen*. In: Granig, P. et al. (Hrsg.): *Mit Innovationsmanagement zu Industrie 4.0. Grundlagen, Strategien, Erfolgsfaktoren und Praxisbeispiele*. Wiesbaden: Springer Gabler 2018, S. 71-82. ISBN: 978-3-658-11667-5.

MAY & KOCH 2008

May, C.; Koch, A.: Overall Equipment Effectiveness (OEE). *Werkzeug zur Produktivitätssteigerung*. *ZUb Zeitschrift der Unternehmensberatung* (2008) 6, S. 245-250.

MAY 2007

May, C.: *Die 16 Verlustarten von TPM*. Fachhochschule Ansbach. 2007.

MCKINSEY DIGITAL 2016

McKinsey Digital: Industry 4.0 after the initial hype. Where manufacturers are finding value and how they can best capture it. Düsseldorf: McKinsey & Company 2016.

MERHAR ET AL. 2019

Merhar, L.; Höllthaler, G.; Berger, C.: Digitale Assistenzsysteme für die Produktion: Von der Zielfindung bis zur Einbindung gemeinsam mit den Mitarbeitern. In: Bosse, C. K.; Zink, K. J. (Hrsg.): Arbeit 4.0 im Mittelstand. Chancen und Herausforderungen des digitalen Wandels für KMU. Berlin: Springer Gabler 2019, S. 279-302. ISBN: 978-3-662-59474-2.

METTERNICH ET AL. 2017

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

MEUDT ET AL. 2016A

Meudt, T.; Leipoldt, C.; Metternich, J.: Der neue Blick auf Verschwendungen im Kontext von Industrie 4.0. Detaillierte Analyse von Verschwendungen in Informationslogistikprozessen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (2016) 11, S. 754-758.

MEUDT ET AL. 2016B

Meudt, T.; Rößler, M.; Böllhoff, J.; Metternich, J.: Wertstromanalyse 4.0. Ganzheitliche Betrachtung von Wertstrom und Informationslogistik in der Produktion. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (2016) 6, S. 319-323.

MEUDT ET AL. 2017A

Meudt, T.; Kaiser, J.; Metternich, J.; Spieckermann, S.: Wertstrommodellierung und -simulation im Zeichen von Digitalisierung und Industrie 4.0. Eine App zur Produktionsoptimierung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) 12, S. 865-868.

MEUDT ET AL. 2017B

Meudt, T.; Metternich, J.; Abele, E.: Value stream mapping 4.0: Holistic examination of value stream and information logistics in production. CIRP Annals – Manufacturing Technology 66 (2017), S. 413-416.

MOLENDI ET AL. 2019

Molenda, P.; Jugenheimer, A.; Haefner, C.; Oechsle, O.; Karat, R.: Methodology

for the visualization, analysis and assessment of information processes in manufacturing companies. *Procedia CIRP* 84 (2019), S. 5-10.

MÖNCH 2006

Mönch, L.: Agentenbasierte Produktionssteuerung komplexer Produktionssysteme. Habilitationsschrift Technische Universität Illmenau (2005). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006. ISBN: 3-8350-0249-X.

MONOSTORI ET AL. 2016

Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihn, W.; Ueda, K.: Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 65 (2016) 2, S. 621-641.

MORTENSON ET AL. 2015

Mortenson, M. J.; Doherty, N. F.; Robinson, S.: Operational research from Taylorism to Terabytes: A research agenda for the analytics age. *European Journal of Operational Research* 241 (2015), S. 583-595.

MÜLLER 2017

Müller, H.-E.: Unternehmensführung. Strategie – Management – Praxis. 3. Auflage. Oldenbourg: De Gruyter 2017. ISBN: 978-3-11-047149-6.

MUNDT ET AL. 2019

Mundt, C.; Winter, M.; Heuer, T.; Hübner, M.; Seitz, M.; Schmidhuber, M.; Maibaum, J.; Bank, L.; Roth, S.; Scherwitz, P.; Theumer, P.: PPS-Report 2019. Studienergebnisse. Garbsen: TEWISS 2019. ISBN: 978-3-95900-402-2.

NAGEL 2003

Nagel, M.: Flexibilitätsmanagement. Ein systemdynamischer Ansatz zur quantitativen Bewertung von Produktionsflexibilität. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2003. ISBN: 978-3-322-81099-1.

NOESKE 1999

Noeske, M.: Durchlaufzeiten in Informationsprozessen. Wege zur Beschleunigung der Informationsverarbeitung. Wiesbaden: Springer Fachmedien 1999. ISBN: 978-3-322-89916-3.

NYHUIS ET AL. 2015

Nyhuis, P.; Grigutsch, M.; Nywlt, J.; Nicolay, C.: Die Simulation als Enabler für logistische Modelle. Entwicklung eines universellen Simulationstools zur umfassenden Validierung logistischer Modelle. *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 4, S. 174-178.

OBERMAIER ET AL. 2019

Obermaier, R.; Hofmann, J.; Wagenseil, V.: Systematische Abschätzung von Wirtschaftlichkeitseffekten von Industrie-4.0-Investitionen mithilfe von Prozess- und Potenzialanalysen. In: Obermaier, R. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. Wiesbaden: Springer Gabler 2019, S. 189-204. ISBN: 978-3-658-24576-4.

OESTERREICH & TEUTEBERG 2016

Oesterreich, T. D.; Teuteberg, F.: Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. Computers in Industry 83 (2016), S. 121-139.

OHNO 2013

Ohno, T.: Das Toyota-Produktionssystem. 3. Auflage. Frankfurt am Main: Campus 2013. ISBN: 978-3-593-39929-4.

OMG 2013

OMG: Business Process Model and Notation (BPMN). Object Management Group. 2013.

OMOGBAI & SALONITIS 2016

Omogbai, O.; Salonitis, K.: Manufacturing system lean improvement design using discrete event simulation. Procedia CIRP 57 (2016), S. 195-200.

O'SHEA 2016

O'Shea, M.: Digitalisierung – unterstützt durch Informationslogistik. Wirtschaftsinformatik & Management 8 (2016) 5, S. 62-71.

PATZAK 1982

Patzak, G.: Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1982. ISBN: 978-3-642-81893-6.

PAWELLEK 2014

Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-662-43728-5.

PETER & LANZA 2011

Peter, K.; Lanza, G.: Company-specific quantitative evaluation of lean production methods. Production Engineering Research and Development 5 (2011), S. 81-87.



PETER 2009

Peter, K.: Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion. Dissertation Universität Karlsruhe (2009). 2009.

PFEFFER 2014

Pfeffer, M.: Bewertung von Wertströmen. Kosten-Nutzen- Betrachtung von Optimierungsszenarien. Wiesbaden: Springer Gabler 2014. ISBN: 978-3-658-02128-3.

PFOHL 2000

Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2000. ISBN: 978-3-662-08414-4.

PLEHN 2017

Plehn, C.: A Method for Analyzing the Impact of Changes and their Propagation in Manufacturing Systems. Dissertation Technische Universität München (2017). 2017.

POKORNI ET AL. 2017

Pokorni, B.; Schlund, S.; Findeisen, S.; Tomm, A.; Euper, D.; Mehl, D.; Brehm, N.; Ahmad, D.; Ohlhausen, P.; Palm, D.: Produktionsassessment 4.0. Entwicklung eines Reifegradmodells zur Bewertung der Lean Management und Industrie-4.0-Reife von produzierenden Unternehmen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) 1-2, S. 20-24.

PONNAMBALAM ET AL. 1999

Ponnambalam, S. G.; Aravindan, P.; Naidu, G. M.: A Comparative Evaluation of Assembly Line Balancing Heuristics. International Journal of Advanced Manufacturing Technologies 15 (1999), S. 577-586.

PRADES ET AL. 2013

Prades, L.; Romero, F.; Estruch, A.; García-Dominguez, A.; Serrano, J.: Defining a Methodology to Design and Implement Business Process Models in BPMN According to the Standard ANSI/ISA-95 in a Manufacturing Enterprise. Procedia Engineering 63 (2013), S. 115-122.

PRINZ ET AL. 2018

Prinz, C.; Kreggenfeld, N.; Kuhlenkötter, B.: Lean meets Industrie 4.0 – a practical approach to interlink the method world and cyber-physical world. Procedia Manufacturing 23 (2018), S. 21-26.

RABE ET AL. 2008A

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: A new procedure model for verification

and validation in production and logistics simulation. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference IEEE (2008), S. 1717-1726.

RABE ET AL. 2008B

Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-35282-2.

RAMSAUER 2013

Ramsauer, C.: Industrie 4.0 – Die Produktion der Zukunft. WINGbusiness (2013) 3, S. 6-12.

REFA 1992

REFA: Methodenlehre des Arbeitsstudiums. Teil 2: Datenermittlung. 7. Auflage. München: Carl Hanser 1992. ISBN: 3-446-14235-5.

REICHMANN 2014

Reichmann, T.: Controlling mit Kennzahlen. Die systemgestützte Controlling-Konzeption mit Analyse- und Reportinginstrumenten. 8. Auflage. München: Franz Vahlen 2014. ISBN: 978-3-800-63800-0.

REINHART & BAUERNHANSL 2018

Reinhart, G.; Bauernhansl, T.: Von der Digitalen zur Biologischen Transformation. wt Werkstattstechnik online 108 (2018) 3, S. 107.

REINHART & BAUERNHANSL 2020

Reinhart, G.; Bauernhansl, T.: Industrie 4.0 – und was nun? wt Werkstattstechnik online 110 (2020) 3, S. 86.

REINHART & ZÜHLKE 2017

Reinhart, G.; Zühlke, D.: Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. XXXI-XL. ISBN: 978-3-446-44989-3.

REINHART ET AL. 1996

Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement: Springer 1996.

REINHART ET AL. 2010

Reinhart, G.; Karl, F.; Krebs, P.; Reinhardt, S.: Energiewertstrom. Eine Methode zur ganzheitlichen Erhöhung der Energieproduktivität. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 10, S. 870-875.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Karl, F.; Krebs, P.; Maier, T.; Niehues, K.; Niehues, M.; Reinhardt,

S.: Energiewertstromdesign. Ein wichtiger Bestandteil zum Erhöhen der Energieproduktivität. *wt Werkstattstechnik online* 101 (2011) 4, S. 253-260.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Magenheimer, K. A.; Greitemann, J.: Verschwendungsfokussierte Prozessmodellierung. Verschwendungsorientierte Aufnahme und Abbildung von Prozessen indirekter Unternehmensbereiche. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 107 (2012) 4, S. 235-239.

RICE 1963

Rice, A. L.: *The Enterprise and its Environment. A system theory of management organization.* London: Tavistock Press 1963. ISBN: 0-415-26445-6.

RICHTER 2018

Richter, C.: *Modellbasierte Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau.* Dissertation Technische Universität München (2018). 2018.

RISCH ET AL. 2011

Risch, F.; Berndt, R.; Franke, J.: Schlanke Informationsflüsse für eine effiziente Produktion. Verbesserte Verfügbarkeit und Nutzung produktionsrelevanter Informationen durch standardisierte Datenbereitstellungs- und Änderungsprozesse. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 106 (2011) 10, S. 706-710.

ROBRA-BRISSANZ & SIEMON 2019

Robra-Brissanz, S.; Siemon, D.: Kooperationen in der Digitalen Wirtschaft. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 56 (2019), S. 7-21.

ROESSLER ET AL. 2014

Roessler, M. P.; Metternich, J.; Abele, E.: Learning to See Clear: Quantification and Multidimensional Assessment of Value Stream Mapping Alternatives Considering Variability. *Business and Management Research* 3 (2014) 2, S. 93-109.

ROESSLER ET AL. 2015

Roessler, M. P.; Riemer, J.; Mueller, M.: Decision Support for Choosing an Appropriate Simulation Method for Dynamic Material Flow Analysis. *Journal of Industrial and Intelligent Information* 3 (2015) 4, S. 337-341.

ROH 2019

Roh, P.: *Methoden zur datengetriebenen Lokalisierung des Verbesserungspotentials in Produktionsabläufen.* Dissertation Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2019). 2019.

ROH ET AL. 2019

Roh, P. H.; Kunz, A.; Wegener, K.: Information stream mapping: Mapping, analysing and improving the efficiency of information streams in manufacturing value streams. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 25 (2019), S. 1-13.

ROHWEDER ET AL. 2018

Rohweder, J. P.; Kasten, G.; Malzahn, D.; Piro, A.; Schmid, J.: Informationsqualität – Dimensionen, Definitionen, Begriffe. In: Hildebrand, K. et al. (Hrsg.): *Daten- und Informationsqualität. Auf dem Weg zur Information Excellence*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2018, S. 23-43. ISBN: 978-3-658-21994-9.

ROSCHER 2008

Roscher, J.: *Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie*. Dissertation Universität Stuttgart (2007): Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb 2008.

ROSSINI ET AL. 2019

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

RÖBLER & HASCHEMI 2017

Rößler, M.; Haschemi, M.: *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 (2017) 10, S. 699-703.

ROTH 2016

Roth, A.: *Industrie 4.0 – Hype oder Revolution?* In: Roth, A. (Hrsg.): *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2016, S. 1-16. ISBN: 978-3-662-48505-7.

ROTHER & SHOOK 2009

Rother, M.; Shook, J.: *Learning to see. Value-stream mapping to create value and eliminate muda*. Cambridge: Lean Enterprise Institute 2009. ISBN: 978-0-966-78430-5.

## ROTHER ET AL. 2015

Rother, M.; Shook, J.; Wiegand, B.: Sehen lernen. Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen. Mülheim an der Ruhr: Lean Management Institut 2015. ISBN: 978-3-9809521-1-8.

## ROY 2017

Roy, D. T.: Industrie 4.0 – Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme zur Unterstützung des Logistikmanagements in der Smart Factory. Dissertation Technische Universität Berlin (2017). Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin 2017. ISBN: 978-3-7983-2945-4.

## SCHAEDE ET AL. 2018

Schaede, C.; Meudt, T.; Metternich, J.; Martin, J.; Munsch, S.: CNC-Programme automatisiert erstellen. Kundenindividuelle Varianten wie in Serie fertigen. Fabriksoftware 23 (2018) 3, S. 24-26.

## SCHATZ &amp; BAUERNHANSL 2017

Schatz, A.; Bauernhansl, T.: Geschäftsmodell-Innovationen. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.1. Produktion. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 245-259. ISBN: 978-3-662-45279-0.

## SCHILLIG ET AL. 2013

Schillig, R.; Stock, T.; Müller, E.: Energiewertstromanalyse. Eine Methode zur Optimierung von Wertströmen in Bezug auf den Zeit- und den Energieeinsatz. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 1-2, S. 20-26.

## SCHINDLER 2015

Schindler, S.: Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion. Dissertation Technische Universität München (2014). München: Herbert Utz 2015. ISBN: 978-3-8316-4434-6.

## SCHMID 1999

Schmid, C.: Informationsflüsse in Zuliefernetzwerken. Wiesbaden: Springer Fachmedien 1999. ISBN: 978-3-663-08218-7.

## SCHMIDT &amp; ZAHN 2015

Schmidt, S.; Zahn, T.: Einführung Ganzheitlicher Produktionssysteme. In: Dombrowski, U.; Mielke, T. (Hrsg.): Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015, S. 171-187. ISBN: 978-3-662-46164-8.

SCHMIDT 2009

Schmidt, S.: Die Diffusion komplexer Produkte und Systeme. Ein systemdynamischer Ansatz. Dissertation Brandenburgische Technische Universität Cottbus (2008). Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-1446-0.

SCHMIDT 2011

Schmidt, S.: Regelung des Implementierungsprozesses Ganzheitlicher Produktionssysteme. Aachen: Shaker 2011. ISBN: 978-3-844-00142-6.

SCHMIDTCHEN & THEIL 2015

Schmidtchen, K.; Theil, F.: Vermeidung von Verschwendung. In: Dombrowski, U.; Mielke, T. (Hrsg.): Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015, S. 32-49. ISBN: 978-3-662-46164-8.

SCHMIDTKE ET AL. 2014

Schmidtke, D.; Heiser, U.; Hinrichsen, O.: A simulation-enhanced value stream mapping approach for optimisation of complex production environments. International Journal of Production Research 52 (2014) 20, S. 6146-6160.

SCHNELLBACH 2016

Schnellbach, P.: Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme. Dissertation Technische Universität München (2015). München: Herbert Utz 2016. ISBN: 978-3-8316-4540-4.

SCHRÖDER & TOMANEK 2019

Schröder, J.; Tomanek, D. P.: Wertschöpfungsmanagement – Grundlagen und Verschwendung. Hochschule Ingolstadt. 2019.

SCHUH & SCHMIDT 2014

Schuh, G.; Schmidt, C.: Grundlagen des Produktionsmanagements. In: Schuh, G.; Schmidt, C. (Hrsg.): Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management 5. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014, S. 1-62. ISBN: 978-3-642-54288-6.

SCHUH ET AL. 2014A

Schuh, G.; Schmidt, C.; Hering, N.: Produktionsbedarfsplanung. In: Schuh, G.; Schmidt, C. (Hrsg.): Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management 5. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014, S. 151-196. ISBN: 978-3-642-54288-6.

SCHUH ET AL. 2014B

Schuh, G.; Schmidt, C.; Schürmeyer, M.: Eigenfertigungsplanung und -steuerung. In: Schuh, G.; Schmidt, C. (Hrsg.): Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management 5. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014, S. 197-234. ISBN: 978-3-642-54288-6.

SCHUH ET AL. 2016

Schuh, G.; Drescher, T.; Engel, M.; Kreutzer, R.: Comprehensive Technology Exploitation Using System Dynamics and Scenario Analysis. *Journal of Business and Economics* 7 (2016) 5, S. 762-775.

SCHUH ET AL. 2017

Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier J.; Hompel, M. ten; Wahlster, W. (Hrsg.): Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten. München: Herbert Utz 2017.

SCHUMACHER ET AL. 2016

Schumacher, A.; Erol, S.; Sihni, W.: A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP* 52 (2016), S. 161-166.

SEIBOLD ET AL. 2016

Seibold, B.; Schwarz-Kocher, M.; Salm, R.: Ganzheitliche Produktionssysteme. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung 2016. ISBN: 978-3-86593-248-8.

SEIFERMANN ET AL. 2017

Seifermann, S.; Böllhoff, J.; Adolph, S.; Abele, E.; Metternich, J.: Flexible Design of Lean Production Systems in Response to Fluctuations Due to Logistics and Traffic. In: Abele, E. et al. (Hrsg.): Dynamic and Seamless Integration of Production, Logistics and Traffic. Fundamentals of Interdisciplinary Decision Support. Cham: Springer 2017, S. 51-82. ISBN: 978-3-319-41097-5.

SEIFERMANN ET AL. 2018

Seifermann, S.; Böllhoff, J.; Schaede, C.; Kutzen, M.; Metternich, J.: Novel method for systematically implement lean production in machining areas. *Procedia CIRP* 78 (2018), S. 61-66.

SHAH & WARD 2007

Shah, R.; Ward, P. T.: Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management* 25 (2007), S. 785-805.

SHOA ET AL. 2014

Shoa, G.; Shin, S.-J.; Jain, S.: Data Analytics Using Simulation for Smart Manufacturing. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference IEEE (2014), S. 2192-2203.

SIEDLER ET AL. 2019A

Siedler, C.; Langlotz, P.; Aurich, J. C.: Identification of interactions between digital technologies in manufacturing systems. Procedia CIRP 81 (2019), S. 115-120.

SIEDLER ET AL. 2019B

Siedler, C.; Sadaune, S.; Zavareh, M. T.; Eigner, M.; Zink, K. J.; Aurich, J. C.: Categorizing and selecting digitization technologies for their implementation within different product lifecycle phases. Procedia CIRP 79 (2019), S. 274-279.

SIEPMANN 2016

Siepmann, D.: Industrie 4.0 – Technologische Komponenten. In: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2016, S. 47-72. ISBN: 978-3-662-48505-7.

SIHN ET AL. 2016

Sihn, W.; Sunk, A.; Nemeth, T.; Kuhlang, P.; Matyas, K.: Produktion und Qualität. Organisation, Management, Prozesse. München: Carl Hanser 2016. ISBN: 978-3-446-44991-6.

SODER 2017

Soder, J.: Use Case Production. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.1. Produktion. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 3-25. ISBN: 978-3-662-45279-0.

SOSSENHEIMER ET AL. 2019

Sossenheimer, J.; Weyand, A.; Schreiber, M.; Hartmann, L.; Fischer, J.; Schebek, L.; Metternich, J.; Abele, E.: Data Acquisition System in Value Streams for Resource Consumption Monitoring and Workpiece Traceability. In: Wulfsberg, J. P. et al. (Hrsg.): Production at the leading edge of technology. Proceedings WGP. Berlin: Springer 2019, S. 593-602. ISBN: 978-3-662-60417-5.

SPALT ET AL. 2013

Spalt, P.; Braun, A.-T.; Schöllhammer, O.: Globales Wertstrommanagement. Eine Methode zur Komplexitätsbeherrschung und kontinuierlichen Verbesserung von Wertschöpfungsnetzen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 12, S. 926-930.



## SPATH 2013

Spath, D.: Einführung in Trends der Nutzung neuer Informationstechnologien. In: Westkämper, E. et al. (Hrsg.): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013, S. 199-200. ISBN: 978-3-642-20259-9.

## SPATH ET AL. 2017

Spath, D.; Schlund, S.; Pokorni, B.; Berthold, M.: Produktionsassessment 4.0 – Integrierte Bewertung variantenreicher Einzel- und Kleinserienfertigung in den Bereichen Lean Management und Industrie 4.0. In: Koether, R.; Meier, K.-J. (Hrsg.): Lean Production für die variantenreiche Einzelfertigung. Flexibilität wird zum neuen Standard. Wiesbaden: Springer Gabler 2017, S. 45-68. ISBN: 978-3-658-13969-8.

## STACHOWIAK 1973

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer 1973. ISBN: 978-3-211-81106-1.

## STADNICKA &amp; LITWIN 2017

Stadnicka, D.; Litwin, P.: VSM Based System Dynamics Analysis to Determine Manufacturing Processes Performance Indicators. 24th International Conference on Production Research (ICPR) (2017), S. 290-295.

## STADNICKA &amp; LITWIN 2019

Stadnicka, D.; Litwin, P.: Value stream mapping and system dynamics integration for manufacturing line modelling and analysis. International Journal of Production Economics 208 (2019), S. 400-411.

## STADTLER 2008

Stadtler, H.: Hierarchische Systeme der Produktionsplanung und -steuerung. In: Arnold, D. et al. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 194-211. ISBN: 978-3-540-72929-7.

## STATISTISCHES BUNDESAMT 2008

Statistisches Bundesamt: Klassifikation der Wirtschaftszweige. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2008.

## STATISTISCHES BUNDESAMT 2020

Statistisches Bundesamt: Industrie, Verarbeitendes Gewerbe. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/_inhalt.html). Zuletzt abgerufen am: 28.07.2020.

## STAUDER 2017

Stauder, J. M.: Anlauforientierte Gestaltung von Fertigungssystemen. Dissertation

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2017). Aachen: Apprimus 2017. ISBN: 978-3-86359-529-6.

STAUFEN AG & PTW 2016

Staufen AG; PTW: 25 Jahre Lean Management. Lean gestern, heute und morgen. Köngen: Staufen AG 2016.

STAUFEN AG 2015

Staufen AG: Deutscher Industrie 4.0 Index 2015. Industrie 4.0 und Lean. Köngen: Staufen AG 2015.

STEFFEN 2001

Steffen, T.: Modellierungsmethode zur Integration zwischenbetrieblicher Informationsflüsse. Dissertation Universität-Gesamthochschule Paderborn (2001). 2001.

STEINHÄUBER 2019

Steinhäuber, T.: Methode zur Reifebewertung und Priorisierung von Aufgaben in der Serienreifmachung komplexer Produkte. Dissertation Technische Universität München (2019). 2019.

STERMAN 2000

Sterman, J. D.: Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin McGraw-Hill 2000. ISBN: 978-0-07-231135-8.

TESFAMARIAM & LINDBERG 2005

Tesfamariam, D.; Lindberg, B.: Aggregate analysis of manufacturing systems using symstem dynamics and ANP. Computers & Industrial Engineering 49 (2005), S. 98-117.

TEUBNER ET AL. 2017

Teubner, S.; Reinhart, G.; Bengler, K.; Rimpau, C.; Intra, C.: Individuelle dynamische Werkerinformationssysteme. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. 66-77. ISBN: 978-3-446-44989-3.

THE ANYLOGIC COMPANY 2019

The AnyLogic Company: AnyLogic. <https://www.anylogic.de/>. Zuletzt abgerufen am: 22.03.2019.

THE ANYLOGIC COMPANY 2020

The AnyLogic Company: Software Manual. AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.5.2. 2020.

TÖPFER & GÜNTHER 2009

Töpfer, A.; Günther, S.: Mehrere Wege zu verschwendungsfreien Prozessen und Null-Fehler-Qualität: Einführung und Überblick über die Beiträge. In: Töpfer, A. (Hrsg.): Lean Six Sigma. Erfolgreiche Kombination von Lean Management, Six Sigma und Design for Six Sigma. Berlin, Heidelberg: Springer 2009, S. 3-23. ISBN: 978-3-540-85060-1.

UCKELMANN 2014

Uckelmann, D.: Wertstromorientierte Informationsflüsse für Industrie 4.0. Kernprozesse und Gestaltungsvariablen. *Industrie Management* 30 (2014) 6, S. 13-16.

ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). *WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium* (1976) 7, S. 304-309.

ULRICH 1982

Ulrich, H.: Anwendungsorientierte Wissenschaft. *Die Unternehmung* 36 (1982) 1, S. 1-10.

UNGERN-STERMBERG ET AL. 2019

Ungern-Sternberg, R.; Leipoldt, C.; Erlach, K.: Konzeption digital vernetzter Produktionen. Zielorientierte Gestaltung ganzheitlicher Produktionssysteme mittels Reifegraden für Industrie 4.0. *wt Werkstattstechnik online* 109 (2019) 7/8, S. 527-530.

UNTERBERGER 2020

Unterberger, E.: Methodik zur Gestaltung energieflexibler Produktionssysteme. Dissertation Technische Universität München (2020). 2020.

URNAUER & METTERNICH 2019

Urnauer, C.; Metternich, J.: Die digitale Wertstrommethode. Process Mining als digitale Stütze der Wertstromanalyse. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (2019) 12, S. 855-858.

URNAUER ET AL. 2019

Urnauer, C.; Kaiser, J.; Gunkel, M.; Metternich, J.: Multidimensional Assessment of Value Stream Design Alternatives. *Procedia CIRP* 86 (2019), S. 264-269.

UYGUN 2013

Uygun, Y.: GPS-Diagnose – Diagnose und Optimierung der Produktion auf Basis Ganzheitlicher Produktionssysteme. *Dortmunder Initiative zur rechnerintegrierten Fertigung RIF*. 2013.

VBW 2017

vbw: Neue Wertschöpfung durch Digitalisierung. Analyse und Handlungsempfehlungen. München: Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft (vbw) 2017.

VDI & NAMUR 2015

VDI; NAMUR: Thesen und Handlungsfelder. Technologie-Roadmap "Prozesssensoren 4.0". Düsseldorf: VDI, NAMUR 2015.

VDI 2870-1

VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2870-1: Ganzheitliche Produktionssysteme. Blatt 1: Grundlagen, Einführung und Bewertung. Berlin: Beuth 2012.

VDI 2870-2

VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2870-2: Ganzheitliche Produktionssysteme. Blatt 2: Methodenkatalog. Berlin: Beuth 2013.

VDI 2893

VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2893: Auswahl und Bildung von Kennzahlen in der Instandhaltung. Berlin: Beuth 2006.

VDI 3633

VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Begriffe. Berlin: Beuth 2018.

VDI 3633-1

VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3633-1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Blatt 1: Grundlagen. Berlin: Beuth 2018.

VDI 3649

VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3649: Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme: 1992.

VDI 4006-1

VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4006-1: Menschliche Zuverlässigkeit. Blatt 1: Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung. Berlin: Beuth 2015.

VDI 4400-2

VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4400-2: Logistikkennzahlen für die Produktion. Blatt 2. Berlin: Beuth 2004.

VDI 4486

VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4486: Zuverlässigkeit in der Intralogistik. Leistungsverfügbarkeit. Berlin: Beuth 2012.

## VDMA &amp; PTW 2018

VDMA; PTW: Leitfaden Industrie 4.0 trifft Lean. Wertschöpfung ganzheitlich steigern. Frankfurt am Main: VDMA 2018. ISBN: 978-3-8163-0721-1.

## VDMA 2018

VDMA: Impuls. Produktivitätsparadoxon im Maschinenbau. Mannheim, Karlsruhe: VDMA 2018.

## VERHAGEN ET AL. 2015

Verhagen, W. J.; Vrugt, B. de; Schut, J.; Curran, R.: A method for identification of automation potential through modelling of engineering processes and quantification of information waste. *Advanced Engineering Informatics* 29 (2015) 3, S. 307-321.

## WAGNER ET AL. 2017

Wagner, T.; Herrmann, C.; Thiede, S.: Industry 4.0 impacts on lean production systems. *Procedia CIRP* 63 (2017), S. 125-131.

## WANG &amp; STRONG 1996

Wang, R. Y.; Strong, D. M.: Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers. *Journal of Management Information Systems* 12 (1996) 4, S. 5-34.

## WEBER ET AL. 2018

Weber, M. A.; Jeske, T.; Lennings, F.: Nutzen der Digitalisierung für die Gestaltung produktiver Produktionsprozesse. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (2018) 6, S. 426-430.

## WEIGERT &amp; ROSE 2011

Weigert, G.; Rose, O.: Stell- und Zielgrößen. In: März, L. et al. (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 29-39. ISBN: 978-3-642-14536-0.

## WEMHÖNER 2006

Wemhöner, N.: *Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau*. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2005). Aachen: Shaker 2006. ISBN: 978-3-8322-5111-6.

## WENGLER 2009

Wengler, M.: *Ganzheitliche Produktionssysteme*. In: Bullinger, H.-J. et al. (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2009, S. 574-580. ISBN: 978-3-540-87595-6.

## WENZEL ET AL. 2008

Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: *Qualitätskriterien*

für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-35276-1.

WERNER 2017

Werner, H.: Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2017. ISBN: 978-3-658-18384-4.

WESKAMP 2018

Weskamp, M.: Modell zur Bewertung von Investitionen zur Steigerung der Ökoeffektivität innerbetrieblicher Wertschöpfungsketten. Dissertation Universität Stuttgart (2017). Stuttgart: Fraunhofer 2018. ISBN: 978-3-8396-1324-5.

WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016

Westkämper, E.; Löffler, C.: Strategien der Produktion. Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016. ISBN: 978-3-662-48914-7.

WIEGAND 2018

Wiegand, B.: Der Weg aus der Digitalisierungsfalle. Mit Lean Management erfolgreich in die Industrie 4.0. Wiesbaden: Springer Gabler 2018. ISBN: 978-3-658-16511-6.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Auflage. München: Carl Hanser 2010. ISBN: 978-3-446-41878-3.

WIENDAHL 2011

Wiendahl, H.-H.: Auftragsmanagement der industriellen Produktion. Grundlagen, Konfiguration, Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-19149-7.

WIENDAHL ET AL. 2014

Wiendahl, H.-P.; Reichhardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2. Auflage. München, Wien: Carl Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43702-9.

WINTER ET AL. 2008

Winter, R.; Schmaltz, M.; Dinter, B.; Bucher, T.: Das St. Galler Konzept der Informationslogistik. In: Dinter, B.; Winter, R. (Hrsg.): Integrierte Informationslogistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 1-16. ISBN: 978-3-540-77578-2.

WISCHMANN ET AL. 2016

Wischmann, S.; Wangler, L.; Botthof, A.: Industrie 4.0 – Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2016.

WOLFF 2013

Wolff, M.: Methode zur Wertstromoptimierung mittels simulativer Bewertung von Handlungsalternativen. Dissertation Technische Universität Darmstadt (2013). Aachen: Shaker 2013. ISBN: 978-3-8440-1939-1.

WÖLFLE 2014

Wölfle, M.: Kontextsensitive Arbeitsassistenzsysteme zur Informationsbereitstellung in der Intralogistik. Dissertation Technische Universität München (2014). 2014.

WOMACK & JONES 2013

Womack, J. P.; Jones, D. T.: Lean Thinking. Ballast abwerfen, Unternehmensgewinne steigern. 3. Auflage. Frankfurt, New York: Campus 2013. ISBN: 978-3-593-39843-3.

WOMACK ET AL. 1990

Womack, J. P.; Jones, D. T.; Roos, D.: The Machine that Changed the World. New York: Macmillan Publishing Company 1990. ISBN: 0-89256-350-8.

ZAHN ET AL. 2013

Zahn, T.; Meyer, P.; Meusert, S.: Nachhaltige Vitalisierung und Weiterentwicklung der Ganzheitlichen Produktion. Transformationswellen in der Lean Production – Ein Praxisbeispiel. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 9, S. 629-633.

ZIEGLER ET AL. 2019

Ziegler, S.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Process Mining zur dynamischen Wertstromaufnahme. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 6, S. 327-331.

ZOR ET AL. 2010

Zor, S.; Görlach, K.; Leymann, F.: Using BPMN for Modeling Manufacturing Processes. Universität Stuttgart, Institut für Architektur von Anwendungssystemen (IAAS). 2010.

ZOR ET AL. 2011

Zor, S.; Schumm, D.; Leymann, F.: A Proposal of BPMN Extensions for the Manufacturing Domain. Universität Stuttgart, Institut für Architektur von Anwendungssystemen (IAAS). 2011.

ZÜHLKE 2008

Zühlke, D.: SmartFactory – from Vision to Reality in Factory Technologies. Proceedings of the 17th IFAC World Congress (2008), S. 14101-14108.



## Angeleitete Studierende

Im Rahmen der Promotion sind unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors in den Jahren 2017 bis 2020 zahlreiche Studienarbeiten an der Technischen Universität München (TUM) entstanden. In diesen wurden Fragestellungen hinsichtlich der Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme untersucht und beforscht. Diejenigen Studienarbeiten, deren Erkenntnisse, Inhalte und Ergebnisse teilweise in die vorliegende Dissertation eingegangen sind, sind nachstehend aufgeführt.

*Tabelle A.1: Studienarbeiten, die inhaltlich in der vorliegenden Dissertation Verwendung gefunden haben*

Studienarbeiten von	Titel der Studienarbeiten	Eingegangen in
Ben Lakhal, M. Masterarbeit (2020)	Further development of a system dynamics model of generic production process chains in the context of an information flow oriented value stream method	Abschnitte 5.4 und 6.4
Hornauer, L. Masterarbeit (2019)	System-Dynamics-Modell zur Analyse und Simulation der Effekte von digitalen Technologien auf Kennzahlen in Ganzheitlichen Produktionssystemen	Abschnitte 5.4 und 6.4
Kirchmann, J. Masterarbeit (2020)	Informationsflussorientiertes Wertstromdesign zur Herleitung und Generierung von Digitalisierungsmaßnahmen für Ganzheitliche Produktionssysteme	Abschnitte 5.2, 5.3 und 6.3
Mauß, N.-A. Semesterarbeit (2019)	Methode zur informationsfunktionsorientierten Wertstromanalyse	Abschnitte 5.2, 5.3 und 6.2
Meister, F. Masterarbeit (2018)	Entwicklung eines Systems zur Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Elementen Ganzheitlicher Produktionssysteme für die Zuordnung von Digitalisierungstechnologien	Abschnitt 5.2

Neben der Unterstützung durch die genannten Studierenden sei auch die Unterstützung durch Thomas Hagspühl und Jakob Schnitzler hervorgehoben, die im Rahmen ihrer Tätigkeiten als wissenschaftliche Hilfskräfte am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV unter Anleitung des Autors zur Entwicklung des System-Dynamics-Modells beigetragen haben.

Der Autor dankt allen Studierenden für ihre Unterstützung, ihr Engagement sowie die angenehme und spannende Zusammenarbeit.