

# **Integration des Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

**Nicholas Uwe Frick, M. Sc.**

aus Bad Homburg v. d. Höhe

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. habil. Benjamin Schleich

Tag der Einreichung: 28.06.2024

Tag der mündlichen Prüfung: 09.09.2024

Darmstadt 2024  
D17

Frick, Nicholas Uwe: Integration des Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2024

Tag der mündlichen Prüfung: 09.09.2024

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

*<https://creativecommons.org/licenses/>*

## Vorwort des Herausgebers

Die Wertstrommethode wird in der industriellen Praxis verwendet, um eine transparente Darstellung der Material- und Informationsflüsse zu erzeugen, die zur Herstellung eines Produkts bzw. seiner Komponenten notwendig sind. Gleichzeitig werden die Potenziale zur Verbesserung des Materialflusses und der Eliminierung von Verschwendungen aufgezeigt. Allerdings besitzt die Methode aufgrund ihrer statischen Natur Defizite in der Erzeugung einer objektiven Datenbasis, sodass die Dynamik und Variabilität der Produktionsprozesse nicht dargestellt werden können. Die fortschreitende Digitalisierung und die damit verbundene Zunahme an verfügbaren, aktuellen Daten schafft neue Möglichkeiten für die industrielle Praxis, Prozesse umfassend und zeitnah zu analysieren und zu verbessern. Zur Abbildung und umgehenden Beeinflussung einzelner Systeme wurde im Kontext der Industrie 4.0 das Konzept des Digitalen Zwillings entwickelt. Bislang fehlt jedoch eine Systematik, welche dieses Konzept auf ganze Wertströme überträgt.

Die vorliegende Dissertation widmet sich daher der Weiterentwicklung der Wertstrommethode durch die Integration des Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement. Das Ziel ist es, mithilfe eines virtuellen Abbilds des physischen Wertstroms die Transparenz entlang des Wertstroms zu erhöhen und die kontinuierliche Verbesserung zu unterstützen. Der Digitale Wertstromzwilling, soll so einen Beitrag zur Reduktion von Verschwendung in verbundenen Produktionsprozessen leisten. Den Kern der Arbeit stellt die Entwicklung eines Gestaltungsmodells für den Digitalen Zwilling eines Wertstroms dar. Das Gestaltungsmodell ermöglicht es Unternehmen, ein dynamisches Abbild ihres Wertstroms zu erstellen und mit dessen Hilfe fortlaufend aktuelle Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Zudem wurde im Rahmen der Arbeit ein methodisches Vorgehen entwickelt, welches Einführung und Betrieb des Digitalen Wertstromzwillings unterstützt.

Die Evaluation von Gestaltungsmodell und Einführungsverfahren erfolgt in zwei industriellen Anwendungsfällen und in einer realitätsnahen Lernumgebung. Sie zeigt, dass durch den Digitalen Zwilling kurzzyklisch Verschwendungen im Wertstrom erkannt und durch Gegenmaßnahmen adressiert werden können. Die Dissertation leistet somit einen wichtigen Beitrag zur zukunftsorientierten Weiterentwicklung der schlanken, digitalen Produktion.

Darmstadt, im September 2024

Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich

## Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt. Sie ist das Ergebnis meiner fünfjährigen Forschungsaktivitäten im Bereich der Themenfelder Wertstrommethode, Digitalisierung der Produktion und Digitale Zwillinge.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich für die Betreuung dieser Arbeit sowie das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheiten, die mir im Rahmen meiner Rollen am PTW – als Projektleiter diverser Forschungsprojekte oder der Gruppenleitung der Forschungsgruppe CiP – gegeben wurden. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Benjamin Schleich danke ich für die bereitwillige Übernahme des Koreferats sowie dem Interesse am Themenfeld des Digitalen Zwillings.

Großen Einfluss auf den Erfolg dieser Arbeit hatten die Unternehmen, die es mir ermöglichten, anwendungsnahe Produktionsforschung zu betreiben. Insbesondere danke ich Mario Quaty und Andreas Henner für drei Jahre praxisnahe und pragmatische Forschung im Rahmen des Forschungsprojektes DiNaPro sowie Amantia Simixhiu und Christian Seidel für die Umsetzung in den Lernfabriken.

Meinen Kolleg:innen am PTW, insbesondere den Forschungsgruppen CiP und MiP, danke ich für die Zusammenarbeit, die Motivation und die konstruktiven, inhaltlichen Diskussionen. Insbesondere möchte ich mich bedanken bei Dr.-Ing. Christian Urnauer für deine hilfreichen Impulse, Ratschläge sowie die Durchsicht meiner Dissertation. Darüber hinaus gilt mein Dank Dr.-Ing. Sebastian Bardy und Dr.-Ing. Lukas Longard für die fortwährende Motivation und gelegentliche Erinnerung, dass man auch mal loslassen muss! Ganz besonders danken möchte ich Dr.-Ing. Markus Schreiber, Phillip Bausch sowie Sophie Sandner. Ohne eure (Acker-/Rätsel-)Freundschaft und die schönen Abende außerhalb des PTW-Alltages wäre das Durchhalten um einiges schwieriger gewesen.

Mein herzlichster Dank gilt außerdem meiner Familie, die mich immer unterstützt und ermutigt – egal in welcher Lebenslage! Besonders möchte ich aber dir danken, Sarah, für dein Verständnis, deine kritischen aber stets motivierenden Worte und deine Unterstützung, mir im letzten Jahr den Rücken bestmöglich freizuhalten. Danke, dass du mir regelmäßig klar gemacht hast, dass es neben der Dissertation deutlich wichtigere Dinge im Leben gibt und dass der Blick für die kleinen Dinge im Leben viel erfüllender ist. Sei es unsere Milka oder aber eine Wildbiene!

Darmstadt, im September 2024

Nicholas Uwe Frick

---

**INHALTSVERZEICHNIS**


---

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis .....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1 Einleitung .....	1
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Motivation und Problemstellung .....	2
1.3 Forschungsansatz und Aufbau der Arbeit.....	4
2 Stand der Wissenschaft und Technik .....	7
2.1 Schlanke Produktion .....	7
2.2 Wertstrommanagement .....	8
2.2.1 Definition Wertstrommanagement.....	8
2.2.2 Einführung in die Wertstrommethode.....	9
2.2.3 Stärken und Schwächen der Wertstrommethode .....	15
2.2.4 Weiterentwicklungsbedarfe der Wertstrommethode .....	17
2.2.5 Bestehende Weiterentwicklungsansätze .....	19
2.2.6 Zwischenfazit .....	23
2.3 Digitalisierung in der Produktion .....	24
2.3.1 Grundlagen .....	24
2.3.2 Digitalisierung und schlanke Produktion .....	28
2.3.3 Digitalisierung und Wertstrommanagement.....	29
2.3.4 Zwischenfazit .....	35
2.4 Digitaler Zwilling.....	36
2.4.1 Konzept des Digitalen Zwillings.....	36
2.4.2 Digitaler Zwilling im Wertstrommanagement .....	41
2.4.3 Integrative Ansätze.....	42
2.4.4 Zwischenfazit .....	46
2.5 Fazit zum Stand der Wissenschaft und Technik .....	47
3 Forschungskonzeption .....	49
3.1 Forschungsziel .....	49

---

3.2	Formale Anforderungen	51
3.2.1	Formale Anforderungen an das Gestaltungsmodell	51
3.2.2	Formale Anforderungen an die Methode	51
3.3	Forschungskonzeption	52
3.4	Abgrenzung des Anwendungsbereiches	54
4	Untersuchung der Aufgaben des Wertstrommanagements	55
4.1	Vorgehen zur Bestimmung der Aufgaben	55
4.1.1	Vorgehen	55
4.1.2	Auswahl und Beschreibung der Expert:innen	56
4.2	Aufgaben des Wertstrommanagements	57
4.2.1	Kurzfristige Planung	58
4.2.2	Mittelfristige Planung	59
4.2.3	Langfristige Planung	60
4.3	Datenbedarfe im Wertstrommanagement	61
4.4	Zwischenfazit	62
5	Entwicklung des Gestaltungsmodells	65
5.1	Bestimmung der Gestaltungsdimensionen und der -elemente	65
5.1.1	Inhaltliche Anforderungen	65
5.1.2	Aufbau und Durchführung der strukturierten Befragung	66
5.2	Konzeption des Gestaltungsmodells	69
5.3	Detaillierung der Gestaltungselemente	70
5.3.1	Gestaltungsdimension 1: Physische Ebene	70
5.3.2	Gestaltungsdimension 2: Virtuelle Ebene	75
5.3.3	Gestaltungsdimension 3: Verbindungsebene	86
5.4	Zwischenfazit	89
6	Konzeption und Detaillierung der Methode	91
6.1	Konzeption der Methodenstruktur	91
6.2	Methodenbausteine 1-3: Technische Implementierung	93
6.2.1	Methodenbaustein 1: Gestaltung physische Ebene	95
6.2.2	Methodenbaustein 2: Gestaltung virtuelle Ebene	98
6.2.3	Methodenbaustein 3: Gestaltung Verbindungsebene	102
6.3	Methodenbaustein 4: Anwendung im Wertstrommanagement	105

---

6.4 Zwischenfazit -----	107
7 Anwendung und Evaluation-----	109
7.1 Anwendung-----	109
7.1.1 Anwendung des Gestaltungsmodells in der Printmedienindustrie -----	109
7.1.2 Anwendung des Gestaltungsmodells in der Lebensmittelindustrie -----	114
7.1.3 Anwendung der Methode in einer standardisierten Laborumgebung-----	117
7.2 Evaluation -----	125
7.3 Fazit und kritische Diskussion-----	129
8 Zusammenfassung und Ausblick -----	131
8.1 Zusammenfassung-----	131
8.2 Ausblick-----	133
9 Literaturverzeichnis -----	135
Anhang-----	159
A.1 Symbole der Wertstrommethode-----	159
A.2 Dokumentation systematische Literaturanalyse-----	160
A.3 Leitfaden des Expert:innen-Interviews mit Begleitfragen-----	162
A.4 Strukturierter Fragebogen zur Bestimmung der Gestaltungselemente-----	163
A.5 Übersicht Datentypen -----	164
A.6 Beispiele Normalisierung -----	165
A.7 Übersicht Datenbanktypen -----	167
A.8 Softwarelösungen für die digitale Darstellung eines Wertstroms -----	168
A.9 Übersicht Kommunikationsprotokolle -----	169
A.10 Ergänzungen zum Anwendungsfall Printmedienindustrie -----	171
A.11 Ergänzungen zum Anwendungsfall Lebensmittelindustrie -----	174
A.12 Ergänzungen zum Anwendungsfall standardisierte Laborumgebung ---	178
A.13 Strukturierter Fragebogen zur Evaluation -----	182
A.14 Betreute Abschlussarbeiten -----	183
A.15 Publikationsübersicht -----	184





---

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**


---

Abbildung 1: Einordnung der Unternehmen im Industrie 4.0-Reifegradmodell -----	3
Abbildung 2: Iterativer Lernprozess -----	4
Abbildung 3: Forschungsprozess und Aufbau der Arbeit -----	6
Abbildung 4: Phasen der Wertstrommethode -----	10
Abbildung 5: Schritte der Datensammlung -----	11
Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Wertstromkarte -----	12
Abbildung 7: Die Rolle des Ideal-Zustandes -----	14
Abbildung 8: Dynamische Einflussgrößen auf den Wertstrom -----	17
Abbildung 9: Weiterentwicklungsbedarfe der Wertstrommethode -----	18
Abbildung 10: Weiterentwicklungsrichtungen der Wertstrommethode -----	19
Abbildung 11: Weiterentwicklungsansätze digitalisierte Wertstrommethode -----	23
Abbildung 12: Kernelemente der Industrie 4.0 -----	25
Abbildung 13: Daten für das Wertstrommanagement -----	30
Abbildung 14: Konzept des Digitalen Zwillings -----	37
Abbildung 15: Dimensionen-Modell des Digitalen Zwillings -----	38
Abbildung 16: Integrative Ansätze -----	42
Abbildung 17: Zusammenhang Forschungsziel und Teilziele -----	51
Abbildung 18: Forschungskonzeption der vorliegenden Arbeit -----	53
Abbildung 19: Vorgehen zur Ermittlung der Aufgaben und Definitionen -----	55
Abbildung 20: Aufgaben des Wertstrommanagements -----	57
Abbildung 21: Vorgehen zur Entwicklung des Gestaltungsmodells -----	65
Abbildung 22: Vorgehen zur Definition der inhaltlichen Anforderungen -----	66
Abbildung 23: Empirische Analyse – Anzahl Mitarbeitende und Umsatzverteilung ---	67
Abbildung 24: Empirische Analyse – Branchenzugehörigkeit -----	68
Abbildung 25: Ergebnisse der strukturierten Befragung (n=41) -----	68
Abbildung 26: Struktur des Gestaltungsmodells -----	70
Abbildung 27: Produktfamilie Beispiel -----	71
Abbildung 28: Datenbedarfsmatrix -----	73
Abbildung 29: Überblick über typische Daten in IT-Systemen der Produktion -----	74
Abbildung 30: Erweiterte Datenbedarfsmatrix -----	75
Abbildung 31: Abtastrate und Erfassungsfrequenz für die Datenspeicherung -----	76
Abbildung 32: Phasen der Datenmodellierung -----	77
Abbildung 33: Generalisierung und Spezialisierung der Wertstromentitäten -----	79
Abbildung 34: Systematisierung der Wertstromentitäten -----	80
Abbildung 35: Verknüpfung Datenbanktabellen mit Fremdschlüsseln -----	81
Abbildung 36: Erweiterung der Datenbedarfsmatrix um die Kategorie Datentyp -----	82
Abbildung 37: Beispielhafte deskriptive Datenanalyse und -exploration -----	85
Abbildung 38: Beispielhafte Zeitreihenanalyse -----	86
Abbildung 39: Zusammenhang Gestaltungsprinzipien Schnittstelle Physisch/Virtuell -----	86

---

Abbildung 40: Werkzeugkasten Kommunikationstechnologien-----	87
Abbildung 41: Konzeption der Methodenstruktur -----	91
Abbildung 42: Gesamtübersicht Methodenschritte 1-3 -----	94
Abbildung 43: Methodenschritt 1.3 – Aufbau Datenbedarfsmatrix -----	96
Abbildung 44: Methodenschritt 1.4 – Ausfüllung Datenbedarfsmatrix -----	97
Abbildung 45: Methodenschritt 2.2 – Rückverfolgung entlang des Wertstroms-----	99
Abbildung 46: Methodenbaustein 4 – Anwendung im Wertstrommanagement-----	105
Abbildung 47: Gestaltungsprinzip 1.1 – Betrachtungsgegenstand Wertstrom -----	110
Abbildung 48: Gestaltungsprinzipien 2.2.5-2.2.8 – Logisches Datenmodell -----	111
Abbildung 49: Vorgehen zur Datenbereinigung -----	111
Abbildung 50: Prozessspezifische Visualisierung Printmedienindustrie -----	113
Abbildung 51: Gestaltungselement 1.1 – Betrachtungsgegenstand Wertstrom -----	114
Abbildung 52: Gestaltungselemente 2.1-2.3 – Umsetzung virtuelle Ebene-----	115
Abbildung 53: Vergleich zwischen zwei Produktionstagen und der Kalenderwoche -	116
Abbildung 54: Wertstrom standardisierte Laborumgebung -----	118
Abbildung 55: Konzeptionelles Datenmodell -----	120
Abbildung 56: Logisches Datenmodell-----	120
Abbildung 57: Gesamtübersicht des Wertstroms -----	123
Abbildung 58: Detailseite eines Prozessschrittes -----	123
Abbildung 59: Ergebnis der Evaluation der Anforderungen (n=12) -----	126
Abbildung 60: Auswahl relevanter Wertstromsymbole-----	159
Abbildung 61: Beispiel Erste Normalform -----	165
Abbildung 62: Beispiel Zweite Normalform -----	165
Abbildung 63: Beispiel Dritte Normalform-----	166
Abbildung 64: Wertstrom Printmedienindustrie -----	171
Abbildung 65: Methodenschritt 1.1 – Auswahl Produktfamilie -----	178

---

**TABELLENVERZEICHNIS**


---

Tabelle 1: Stärken der Wertstrommethode -----	16
Tabelle 2: Schwächen der Wertstrommethode -----	17
Tabelle 3: Weiterentwicklungsansätze des Wertstrommanagements -----	20
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Digitalisierung und schlanker Produktion -----	29
Tabelle 5: Zusammenhang der Wertstrommethode mit Industrie 4.0-Technologien ----	35
Tabelle 6: Stärken des Digitalen Zwillings -----	39
Tabelle 7: Herausforderungen des Digitalen Zwillings -----	40
Tabelle 8: Formale Anforderungen an das Gestaltungsmodell -----	51
Tabelle 9: Formale Anforderungen an die Methode-----	52
Tabelle 10: Expert:innen Auswahl-----	56
Tabelle 11: Zusammenhang Aufgaben und Daten des Wertstrommanagements -----	61
Tabelle 12: Inhaltliche Anforderungen an das Gestaltungsmodell-----	66
Tabelle 13: Beispielhafter Event Log-----	76
Tabelle 14: Beispielhafte Ergebnisse des Paarvergleichs und Gewichtung der Anforderungen -----	88
Tabelle 15: Dokumentation der Gestaltungsprinzipien -----	90
Tabelle 16: Übersicht der Anwendungsfälle -----	109
Tabelle 17: Datenqualität Anwendungsfall Printmedienindustrie-----	112
Tabelle 18: Ergebnisse systematische Literaturanalyse-----	160
Tabelle 19: Literatur zur Identifikation der Aufgaben des Wertstrommanagements --	161
Tabelle 20: Leitfaden mit Begleitfragen -----	162
Tabelle 21: Strukturiertes Fragebogen zur Bestimmung der Gestaltungselemente ----	163
Tabelle 22: Übersicht unterschiedlicher Datentypen-----	164
Tabelle 23: Bewertung unterschiedlicher Datenbanktypen zur Darstellung eines Wertstroms -----	167
Tabelle 24: Softwarelösungen für die digitale Darstellung eines Wertstroms-----	168
Tabelle 25: Übersicht über Kommunikationsprotokolle und deren Eigenschaften 1/2	169
Tabelle 26: Übersicht über Kommunikationsprotokolle und deren Eigenschaften 2/2	170
Tabelle 27: Datenbedarfsmatrix Form- und Gießprozess-----	172
Tabelle 28: Datenbedarfsmatrix Nachbehandlung 1/2 -----	172
Tabelle 29: Datenbedarfsmatrix Nachbehandlung 2/2 -----	172
Tabelle 30: Datenbedarfsmatrix Mechanische Fertigung 1/2 -----	173
Tabelle 31: Datenbedarfsmatrix Mechanische Fertigung 2/2 -----	173
Tabelle 32: Anwendungsfall Lebensmittelindustrie – Anforderungen an die Softwarelösung -----	175
Tabelle 33: Gestaltungselement 3.2 – Systematische Gewichtung der Anforderungen (n=4)-----	175
Tabelle 34: Bewertungsskala – Quantitative Bewertungskriterien-----	176
Tabelle 35: Bewertungsskala – Binäre Bewertungskriterien-----	176

---

Tabelle 36: Bewertungsskala – Bewertungskriterien Minimalanforderungen-----	177
Tabelle 37: Gestaltungselement 3.2 – Selektion der Softwarelösung-----	177
Tabelle 38: Datenbedarf standardisierte Laborumgebung – Standort 1, 1/3-----	179
Tabelle 39: Datenbedarf standardisierte Laborumgebung – Standort 1, 2/3-----	179
Tabelle 40: Datenbedarf standardisierte Laborumgebung – Standort 1, 3/3-----	179
Tabelle 41: Anwendungsfall standardisierte Laborumgebung – Anforderungen an die Softwarelösung-----	180
Tabelle 42: Gewichtete Anforderungen an die Softwarelösung (n=7)-----	180
Tabelle 43: Quantitative Bewertungskriterien nach Teilnutzenwerten-----	181
Tabelle 44: Fragebogen zur Evaluation der Anforderungen-----	182
Tabelle 45: Übersicht betreuter Arbeiten mit weiterführenden Informationen-----	183
Tabelle 46: Übersicht Publikationen mit Vorarbeiten zu dieser Arbeit-----	184
Tabelle 47: Übersicht der Forschungsdaten zu dieser Arbeit-----	184

---

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

---

Acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
BDE	Betriebsdatenerfassungs-System
BPMN	Business Process Model and Notation
CPPS	Cyber-physische Produktionssysteme
CPS	Cyberphysisches System
EER-Modell	Erweitertes-Entity-Relationship-Modell
ERP	Enterprise Resource Planning
FiFo	First in First Out
GM	Gestaltungsmodell
I 4.0	Industrie 4.0
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KP	Kurzfristige Wertstromplanung
KT	Kundentakt
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LG	Losgröße
LP	Langfristige Wertstromplanung
MES	Manufacturing Executing System
MP	Mittelfristige Wertstromplanung
NF	Normalform
MS Visio	Microsoft Visio
NFC	Near Field Communication
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PDCA	Plan Do Check Act
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RFID	Radio-Frequency Identification
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TPS	Toyota-Produktionssystem
TU Darmstadt	Technische Universität Darmstadt
UML	Unified Modeling Language
UTC	Universal Time Coordinated
UWB	Ultra-wide Band
WGP	Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik
WSA	Wertstromanalyse
WSD	Wertstromdesign
WSM	Wertstrommethode
WSMM	Wertstrommanagement
WSP	Wertstromplanung



---

## 1 EINLEITUNG

---

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Weiterentwicklung der Wertstrommethode zu einem datenbasierten Management-Ansatz auf Basis des Konzepts des Digitalen Zwilings. Im einleitenden Kapitel wird die Ausgangssituation (Abschnitt 1.1) vorgestellt, die zur Motivation und Problemstellung führt (Abschnitt 1.2). Abschließend werden der Forschungsansatz sowie der Aufbau der Arbeit (Abschnitt 1.3) dargestellt.

### 1.1 Ausgangssituation

Die Produktion ist ein wesentlicher Bestandteil der deutschen Wirtschaft, mit 10,8 Millionen Erwerbstätigen im produzierenden Gewerbe im Jahr 2023 [STAT24c]. Dabei macht der Anteil an der Bruttowertschöpfung aktuell ca. 24 % aus [STAT24a]. Trotzdem steht der Hochlohnstandort Deutschland in Folge der Globalisierung unter einem stetig steigenden Kostendruck [SCHR19], um die *Wirtschaftlichkeit* der Unternehmen sicherzustellen [WINK17, STAU23]. Verstärkt wurde dieser Effekt unter anderem durch die infolge der Pandemie im Jahr 2021 entstandenen Materialengpässe sowie die im Jahr 2023 kriegsbedingten Versorgungsrisiken, Energie und Rohstoffe betreffend [GRÖM23]. So ist im vergangenen Jahr 2023 die Bruttowertschöpfung im produzierenden Gewerbe erstmals in den letzten Jahren um 2,0 % gesunken [STAT24b]. Durch die hieraus resultierende Verschärfung des globalen Kostendrucks, wird eine zunehmende Anpassungsfähigkeit der deutschen Industrie unabdingbar. Auf der anderen Seite stellt die *Qualität* der Produkte einen nicht zu vernachlässigenden Aspekt bei der Kaufentscheidungen der Kunden dar. Das Qualitätssiegel „Made in Germany“ ist weiterhin ein entscheidender Einflussfaktor für Kaufentscheidungen und ermöglicht es Unternehmen, einen Wettbewerbsvorteil gegenüber der globalen Konkurrenz zu erlangen [ABEL11]. Diese Herausforderungen werden durch die zunehmende Individualisierung der Produkte und dem damit einhergehenden Wandel von einem Verkäufer- zu einem Käufermarkt intensiviert [KLET22]. Eine Studie belegt, dass sich bei über 60 % der befragten Unternehmen die Anzahl der produzierten Varianten in den letzten zehn Jahren verzehnfacht hat [BANK21]. Dies zwingt die Unternehmen zu einer erhöhten *Variabilität* und Flexibilität in der Produktion, um die Kundenanforderungen erfüllen zu können [STAU23]. Demnach sind eine hohe Produktivität und Anpassungsfähigkeit sowie die Identifikation von Verbesserungspotenzialen und die Reduktion von Verschwendung zwingende Erfolgsfaktoren für produzierende Unternehmen [STAU19].

An dieser Stelle leisten die Methoden der *schlanken Produktion* (engl.: Lean Production) seit den 1990er Jahren in der deutschen Industrie einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Produktivität und sind daher integraler Bestandteil etablierter Produktionssysteme [LIKE13a, DOMB15]. Dabei besteht die schlanke Produktion nicht nur aus Methoden zur Lösung spezifischer Probleme, sondern umfasst grundlegende Prinzipien sowie Visionen zur Produktionsorganisation und Etablierung einer Unternehmenskultur, die den

Gedanken der kontinuierlichen Verbesserung integriert. Die schlanke Produktion stellt somit einen ganzheitlichen Ansatz zur Gestaltung und Verbesserung eines Produktionssystems dar, wobei die Mitarbeitenden als das zentrale Element gelten [ÖNO13, WOMA97]. Das Zielbild bildet dabei die verschwendungsfreie Ausrichtung aller Aktivitäten eines Wertstroms am aktuellen Kundenbedarf [WOMA97].

Um dieses Ziel zu erreichen, kann die *Wertstrommethode* (WSM) angewendet werden. Sie ermöglicht es, mit geringem Aufwand Material- und Informationsflüsse in der Produktion zu analysieren, Verbesserungspotenziale aufzuzeigen und einen verschwendungsarmen Soll-Zustand anhand definierter Gestaltungsregeln zu konzipieren [DIN20]. Mehrere Studien belegen zum einen den kontinuierlich steigenden Einsatz der Methode in produzierenden Unternehmen [HÄMM10, WINK17] und zum anderen die durch die Anwendung erzielbaren Erfolge [SERR08, ROME17, SHOU17]. Heutige Produktionssysteme werden jedoch aufgrund der hohen Variantenvielfalt zunehmend durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet, was die Analyse von Prozessen und die Umsetzung verschwendungsarmer Soll-Zustände immer schwerer macht [WINK17]. Praktische Erfahrungen zeigen jedoch, dass der Einsatz von Methoden der schlanken Produktion durch gezielte Digitalisierung verbessert werden kann [AGOS21, SILV22].

## 1.2 Motivation und Problemstellung

Studien belegen, dass derzeit in der deutschen Wirtschaft ein signifikantes ungenutztes Wertschöpfungspotenzial im Kontext der *Industrie 4.0*<sup>1</sup> besteht [WILD20]. Dabei ist es für die Zukunftsfähigkeit des Standorts Deutschland essenziell, dass die vierte industrielle Revolution den versprochenen Produktivitätszuwachs liefert [STAU23]. Dieser bleibt bisher allerdings hinter den Erwartungen zurück, was insbesondere im Maschinenbau, einer der zentralen Branchen der Industrie 4.0, zu beobachten ist. Dies ist darin begründet, dass sich die *Digitalisierung* in der Branche aktuell noch in der Investitionsphase befindet, weshalb die erkannten Potenziale bisher nicht vollumfänglich ausgeschöpft werden können. [RAMM18] Häufig investieren die Unternehmen in komplexe technische Lösungen, anstatt sich auf ganzheitliche Prozessverbesserungen zu fokussieren [KINK20]. Statt zuerst Prozesse zu vereinfachen und auf diese Weise Produktivitätsgewinne zu erzielen [STAU16], wird versucht, komplexe Strukturen mithilfe von komplexen IT-Systemen beherrschbar zu machen. Eine erfolgreiche Implementierung der Industrie 4.0 erfordert somit eine Verschiebung des Fokus von rein technologischen Innovationen hin zu einer integrativen Betrachtung, die sowohl Technologie als auch Prozessverbesserung umfasst [VALA20, AGOS21, SILV22]. Dabei sind gemäß des Industrie 4.0-Reifegradmodells der Deutschen Akademie für Technikwissenschaften (acatech) 96 % der Unternehmen bereits vernetzt, die wenigsten (4 %) erzielen allerdings bisher einen weiteren Nutzen in

---

<sup>1</sup> Seit dem Jahr 2011 wird unter dem Begriff *Industrie 4.0* die *vierte industrielle Revolution* bezeichnet. Diese verfolgt die Integration cyberphysischer Systeme (CPS) sowie die informationstechnische Vernetzung der Wertschöpfung als übergeordnetes Ziel. [KAGE13, BAUE16].



Form von *Sichtbarkeit, Transparenz, Prognosefähigkeit* oder *Adaptierbarkeit* (vgl. Abbildung 1) [SCHU20a, SCHU20b].

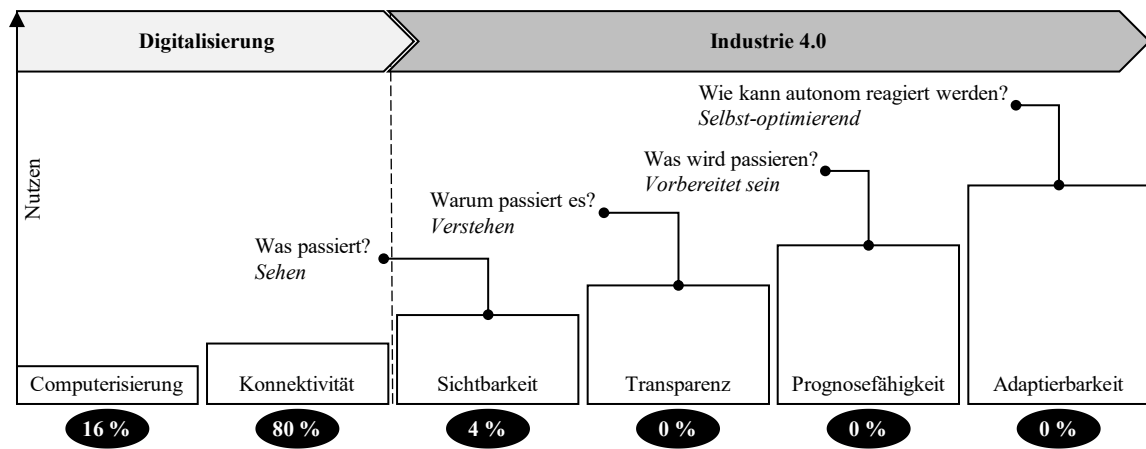


Abbildung 1: Einordnung der Unternehmen im Industrie 4.0-Reifegradmodell (Eigene Darstellung in Anlehnung an [SCHU20a, SCHU20b])

Um demnach den Effekt des Technology Pushes nutzen zu können und die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen zu sichern, ist daher eine Erweiterung der etablierten Methoden der schlanken Produktion mithilfe von Industrie 4.0-Technologien notwendig [MAYR18, AGOS21, SILV22].

In diesem Kontext besteht nach einer Studie von WINKLER UND LUGERT insbesondere ein Weiterentwicklungsbedarf der Wertstrommethode durch die Integration von Industrie 4.0-Technologien. Da es sich bei der Wertstrommethode um eine einmalige Momentaufnahme am Ort der Wertschöpfung mit einem Projektteam handelt, ist die zugrundeliegende Datenaufnahme mit Unsicherheit verbunden. [WINK17] Es zeigt sich, dass die *Aktualität, Genauigkeit und Vollständigkeit der Daten* nur mit hohem personellem Aufwand gewährleistet werden kann [ERLA23]. Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, hat die Wissenschaft untersucht, welche Industrie 4.0-Technologien geeignet sind, um die Aktualität, Genauigkeit und Vollständigkeit der Daten sicherzustellen. Dabei wird dem *Konzept des Digitalen Zwillings* das größte Potenzial zugewiesen [MAYR18, DILL22b, LIU23]. In seiner Eigenschaft als virtuelles Abbild eines physischen Objektes ist der Digitale Zwilling in der Lage, eine regelmäßige *Aktualisierung* der maßgeblichen Wertstromparameter vorzunehmen. Auf diese Weise leistet der Digitale Zwilling einen unmittelbaren Beitrag zur Steigerung der *Genauigkeit und Vollständigkeit* eines Wertstroms. Durch die vollständige Datengrundlage bietet die Verknüpfung des Konzepts des Digitalen Zwillings mit der Wertstrommethode die Möglichkeit, die Reaktionsgeschwindigkeit und Anpassungsfähigkeit in dynamischen Produktionsumfeldern zu verbessern, indem Produktionsdaten zur schnellen Anpassung und Verbesserung von Prozessen genutzt werden können. [FRIC24f] Die damit einhergehende Prozessdigitalisierung ermöglicht es, das Vorgehen der Wertstrommethode durch Integration einer Industrie 4.0-Technologie zu einem ganzheitlichen Management-Ansatz weiterzuentwickeln.

Aus diesen Erwägungen ergibt sich die Motivation sowie die Problemstellung, die dieser Forschungsarbeit zugrunde liegen. Es wird untersucht, wie ein integrativer Ansatz realisiert werden kann, der die Wertstrommethode mit dem Konzept des Digitalen Zwillinges vereint. Insbesondere wird analysiert, wie die Wertstrommethode zu einem datenbasierten Management-Ansatz weiterentwickelt werden kann (Technology Push), um den spezifischen Kundenanforderungen (Market Pull) gerecht zu werden. Eine Detaillierung der Zielsetzung und der zugrundeliegenden Forschungskonzeption erfolgt in Kapitel 3.

### 1.3 Forschungsansatz und Aufbau der Arbeit

Die der Arbeit zugrunde liegende Problemstellung (siehe Abschnitt 1.2) ist der Disziplin des Wirtschaftsingenieurwesens zuzuordnen. Diese stellt eine Verbindung von ingenieurs- mit wirtschaftswissenschaftlichen Inhalten dar, wobei für die Forschung in diesem Kontext die Bearbeitung einer transdisziplinären und praxisorientierten Fragestellung mit wissenschaftlich fundierter Methodik fundamental ist. [SCHU13] Für Forschungsarbeiten in diesem Bereich empfiehlt sich die *Strategie der angewandten Forschung* nach ULRICH [ULRI84]. Ausgangspunkt des Forschungsprozesses stellen Probleme in der Praxis dar, welche im Rahmen des Anwendungszusammenhanges zunächst theoretisch untersucht werden, um abschließend in der Praxis erprobt und adaptiert zu werden [ULRI76]. Der Forschungsprozess wird in diesem Zusammenhang als *iterativer Lernprozess* verstanden, der die theoretische Perspektive präzisiert (vgl. Abbildung 2).

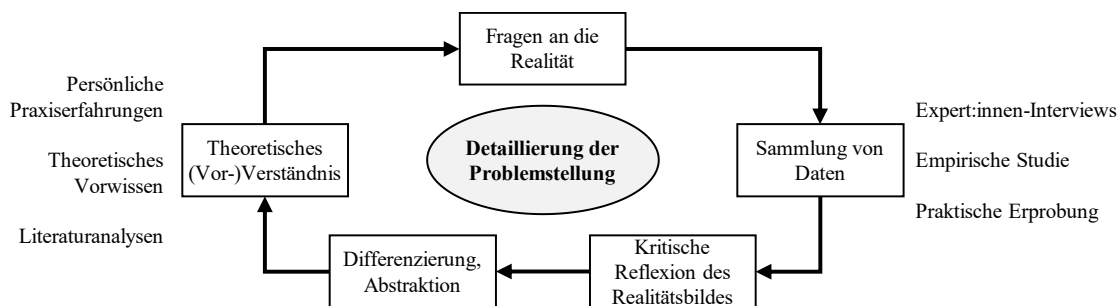


Abbildung 2: Iterativer Lernprozess (Eigene Darstellung in Anlehnung an [TOMC92])

Das *theoretische (Vor-)Verständnis* basiert initial auf dem Vorwissen und den persönlichen Erfahrungen des Autors, die er in themenbezogenen Forschungs- und Industrieprojekten gesammelt hat. Diese Erkenntnisse werden durch Literaturanalysen in den Themenfeldern Produktionsmanagement, Digitalisierung und Vernetzung der Produktion ergänzt, um eine solide Grundlage für die Detaillierung der Problemstellung in Form von *Fragen an die Realität* zu schaffen. Um eine *kritische Reflexion des Realitätsbildes* zu gewährleisten, wird durch die *Sammlung von Daten* der Praxisbezug sichergestellt. Dies wird mithilfe von Expert:innen-Interviews, einer empirischen Studie sowie der praktischen Erprobung des Forschungsgegenstands sichergestellt. Abschließend werden Rückschlüsse bezüglich der Problemstellung durch *Differenzierung und Abstraktion* gezogen und die Lösung iterativ angepasst. Der Forschungszyklus wird wiederholt, bis ein ausreichendes Verständnis der Problemstellung erreicht ist. [TOMC92] Strukturiert wird der

iterative Forschungsprozess durch die *Strategie der angewandten Forschung* nach UL- RICH [ULRI84]. Hierzu veranschaulicht Abbildung 3 den Zusammenhang zwischen den Forschungsphasen der Strategie der angewandten Forschung (links) und den Kapiteln der vorliegenden Arbeit (rechts). Zunächst werden praxisrelevante Fragestellungen aus der Industrie ermittelt, indem die Ausgangssituation sowie die Motivation und Problemstel- lung in *Kapitel 1* erläutert werden. Anschließend werden in *Kapitel 2* die wissenschaftli- chen Grundlagen und bestehende Lösungsansätze für die Problemstellung erarbeitet. Ba- sierend auf den Erkenntnissen wird in *Kapitel 3* das Forschungsziel formuliert, formale Anforderungen definiert, die Forschungskonzeption erarbeitet und eine Abgrenzung des Anwendungsbereiches vorgenommen. Im nächsten Schritt wird der relevante Anwen- dungszusammenhang untersucht. Hierzu widmet sich *Kapitel 4* der Untersuchung der Aufgaben des Wertstrommanagements, welche den Datenbedarf des Digitalen Zwillings des Wertstroms maßgeblich beeinflussen. *Kapitel 5* leitet daraufhin auf Basis der inhalt- lichen Anforderungen aus den Aufgaben des Wertstrommanagements und dem Konzept des Digitalen Zwillings das Gestaltungsmodell inklusive dessen Dimensionen und Ele- menten her. Eine Detaillierung der Gestaltungselemente erfolgt anhand von Gestaltungs- prinzipien. Um das Gestaltungsmodell in der industriellen Praxis anwenden zu können, wird in *Kapitel 6* eine Methode zur Implementierung entwickelt. Sowohl das Gestaltungs- modell als auch die Methode werden anschließend in *Kapitel 7* in der industriellen Praxis angewendet und evaluiert. Das abschließende *Kapitel 8* fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Handlungsfelder und Forschungsaktivitäten.

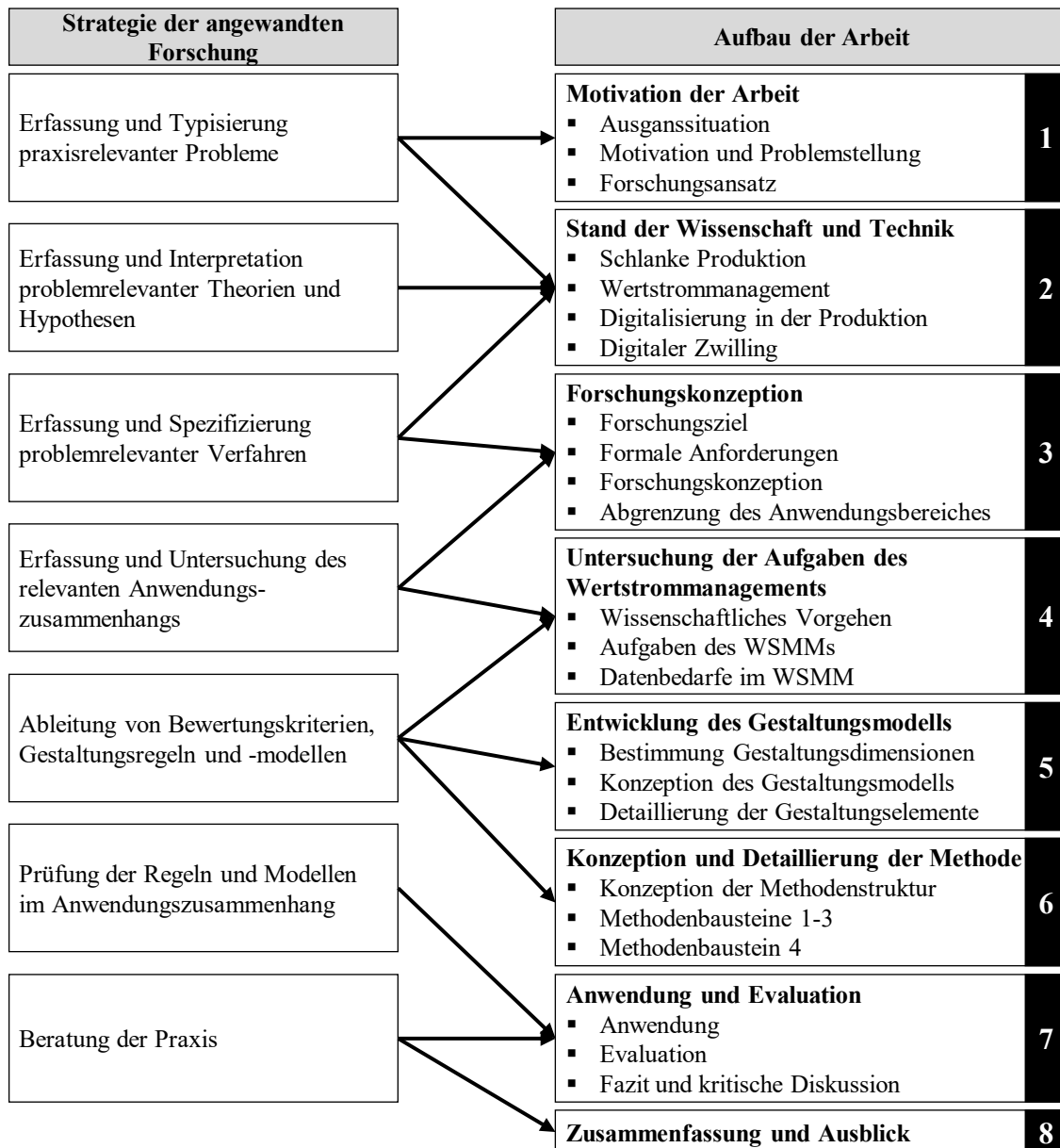


Abbildung 3: Forschungsprozess und Aufbau der Arbeit (Eigene Darstellung in Anlehnung an [ULRI84])

---

## 2 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

---

Die vorliegende Forschungsarbeit befasst sich mit der Weiterentwicklung der Wertstrommethode zu einem Managementansatz im Kontext schlanker Produktionssysteme unter Zuhilfenahme des Konzepts des Digitalen Zwillinges. Aus diesem Grund werden nachstehend die Grundlagen zu schlanken Produktionssystemen (Abschnitt 2.1), dem Wertstrommanagement (Abschnitt 2.2), zur Digitalisierung in der Produktion (Abschnitt 2.3) sowie zum Digitalen Zwilling (Abschnitt 2.4) erläutert. Auf Basis des Stands der Wissenschaft und Technik werden Forschungsbedarfe hergeleitet und das Verständnis für die darauf aufbauenden Forschungsziele und -aktivitäten geschaffen.

### 2.1 Schlanke Produktion

Der Begriff *schlanke Produktion* (engl.: Lean Production) erlangte in Europa und den USA Anfang der 1990er Jahre Bekanntheit durch eine Studie von WOMACK ET AL. und findet überwiegend im westlichen Raum Verwendung [WOMA90, DOMB15]. Die Studie verdeutlichte, über welche Leistungsfähigkeit die japanische gegenüber der amerikanischen und europäischen Automobilindustrie verfügte [GRAF96, KRAF88]. Den Ursprung der schlanken Produktion stellt dabei das *Toyota-Produktionssystem (TPS)* dar. Dieses ist ursprünglich entwickelt worden, um eine große Variantenvielfalt bei geringer Stückzahl flexibel und wettbewerbsfähig produzieren zu können. [ÖNO13] Hierbei werden alle Tätigkeiten am Kundenbedarf ausgerichtet, sodass Verschwendung im Produktionsprozess gezielt reduziert bzw. vermieden werden kann [LIKE13b]. Hierfür wurden im TPS Prinzipien und Methoden der schlanken Produktion in einem Gesamtzusammenhang vereint [LIKE06]. Das TPS wurde von Unternehmen daraufhin als Vorbild genutzt, um eigene, auf ihr Unternehmen adaptierte, Produktionssysteme zu entwickeln, wodurch sich der Begriff *ganzheitliches Produktionssystem (GPS)* hervorgebracht hat [DOMB15]. In der einschlägigen VDI-Richtlinie ist das GPS definiert als „unternehmensspezifisches, methodisches Regelwerk zur umfassenden und durchgängigen Gestaltung der Unternehmensprozesse“ [VDI12]. Grundlage für die Einführung eines Produktionssystems stellen dabei standardisierte Strukturen sowie Abläufe mit stabilen Prozessen dar [REIN03].

Sowohl die schlanke Produktion als auch das GPS beinhalten einzelne Methoden, die jedoch nicht als unabhängig voneinander betrachtet werden sollten. Ihre Wirksamkeit entfalten sie erst im Gesamtkontext des Produktionssystems, dessen Potenzial erst durch die ganzheitliche Implementierung im Unternehmen sowie durch die Nutzung der Synergien zwischen den Methoden erzielt wird [TAKE14]. Kernelement eines funktionierenden schlanken Produktionssystems ist die aktive Einbindung der Mitarbeitenden in die Methodenanwendung sowie die Nutzung und Weiterentwicklung ihrer Fähigkeiten [ROTH13]. Das Produktionssystem ist demnach nicht nur als ein Fertigungssystem, sondern als ein Managementsystem anzusehen, bei dem die Prinzipien der schlanken Produktion in allen Unternehmensbereichen angewendet werden. [ÖNO13] Erfolgreiche

schlanke Produktionssysteme sowie GPS beinhalten somit nicht nur eine reine Methoden-anwendung, sondern die Implementierung einer umfangreichen Kultur und Philosophie im Unternehmen [LIKE13b]. Dieser Grundgedanke lässt sich in den folgenden fünf Prinzipien zusammenfassen [WOMA97]:

- **Spezifikation des Wertes:** Wertschöpfung kann ausschließlich durch die Endverbraucher:innen, die Kunden, definiert werden. Das Unternehmen, der Hersteller, erzeugt diesen Wert. Alles, was für die Kunden keinen Wert besitzt, die sog. Verschwendung, gilt es, zu vermeiden.
- **Identifikation des Wertschöpfungsstromes:** Der Wertschöpfungsstrom, im Allgemeinen als *Wertstrom* bezeichnet, beinhaltet alle erforderlichen spezifischen Tätigkeiten, zur Entwicklung und Herstellung eines Produktes. Hierbei sind alle Tätigkeiten zu eliminieren bzw. zu reduzieren, die nicht unmittelbar dem Kundennutzen dienen.
- **Fluss:** Ziel eines schlanken Unternehmens ist es, die Funktionen und Arbeit der Abteilungen derart zu definieren, dass sie einen positiven Beitrag zur Wertschöpfung leisten. Dabei sollen die wertschöpfenden Aktivitäten möglichst ohne Unterbrechung und kontinuierlich hintereinander stattfinden.
- **Pull:** Die konsequente Ausrichtung des Wertstroms auf die Kundennachfrage bedingt eine nachfragegesteuerte (engl.: pull) Auftragssteuerung. Die Produktion eines spezifischen Produktes ist somit immer an eine spezifische Kundenbestellung geknüpft. Das Gegenteil ist eine auf Prognosen basierende Produktion (engl.: push), welche keine spezifische Kundenbestellungen berücksichtigt.
- **Perfektion:** Durch Umsetzung der vier genannten Prinzipien werden kontinuierlich neue Verschwendungen und Verbesserungspotenziale identifiziert. Durch Umsetzung der Potenziale entsteht das Streben nach Perfektion. Die wichtigste Triebfeder der Perfektion stellt dabei die *Transparenz* dar. Sie ermöglicht unmittelbares Feedback und ist ein starker Ansporn für kontinuierliche Verbesserungsbemühungen.

## 2.2 Wertstrommanagement

Im folgenden Abschnitt wird zunächst eine Definition des Begriffes Wertstrommanagement erarbeitet (Abschnitt 2.2.1), bevor eine allgemeine Einführung in die Wertstrommethode gegeben wird (Abschnitt 2.2.2). Anschließend werden die Stärken und Schwächen der Methoden-anwendung in der industriellen Praxis erläutert (Abschnitt 2.2.2.3), woraus der Weiterentwicklungsbedarf abgeleitet wird (Abschnitt 2.2.4). Dieser wird mit bestehenden Weiterentwicklungsansätzen verglichen (Abschnitt 2.2.5), um abschließend auf dieser Basis den Forschungsbedarf herzuleiten (Abschnitt 2.2.6).

### 2.2.1 Definition Wertstrommanagement

Etymologisch betrachtet besteht der Begriff Wertstrommanagement (WSMM) aus den Bestandteilen *Wertstrom* und *Management*. Während der Begriff Wertstrom bereits

erläutert wurde, ist der Management-Begriff, für den es zwei Sichtweisen gibt, im Folgenden zu definieren. Die institutionelle Sichtweise bezeichnet das Management als die führenden Personen eines Unternehmens. Die zweite Perspektive stellt hingegen eine funktionale Beschreibung dar und definiert das Management als Aufgaben zur Steuerung eines Unternehmens. [SCHR20] Die folgenden Definitionen legen nahe, dass im Kontext des WSMM die zweite Sichtweise etabliert ist.

Laut HINES ET AL. ist das WSMM ein strategischer und ganzheitlicher Ansatz, der auf dem Ansatz der Wertstrommethode beruht. Explizit gilt das WSMM als operativer Ansatz für die Datenerfassung, Analyse und Planung von Implementierungen, welche Änderungen innerhalb von funktions- und unternehmensübergreifenden Prozessen umsetzen sollen, um schlanke Unternehmensstrukturen zu fördern. [HINE98] ERLACH beschreibt das WSMM als die Erfüllung der Aufgaben, die notwendig sind, um den betrachteten Wertstrom auf dem aktuellen Leistungsniveau zu halten und kontinuierlich zu verbessern. Das WSMM zielt darauf ab, die definierten Maßnahmen umzusetzen und zu überprüfen, ob die Zielsetzungen erreicht werden. [ERLA20] ROTHER UND SHOOK wiederum verstehen unter WSMM die Erfüllung anstehender Verbesserungen im Wertstrom, wobei die primäre Aufgabe darin besteht, den Gesamtfluss zu erkennen, eine Vision des schlanken Flusses für die Zukunft zu entwickeln, zu verbessern und die Implementierung der Maßnahmen zu überwachen [ROTH99]. LUGERT entwickelt im Rahmen seiner Dissertation durch die Trennung der Begriffe Wertstrom und Management eine weitere Definition, welche das Verständnis des Begriffes WSMM im Rahmen der vorliegenden Arbeit darlegt [LUGE19b]:

**Definition Wertstrommanagement:**

„Wertstrommanagement meint die Planung, Steuerung und Kontrolle des Wertstroms entlang der zur Herstellung eines klar definierten Zwischen- oder Endproduktes notwendigen Produktionsprozesskette, mit dem Ziel, aus einer ganzheitlichen Wertstromperspektive fortwährend eine optimale Wertstromausgestaltung zu ermöglichen.“

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Begriffe WSMM und Wertstrommethode häufig simultan verwendet werden. Dabei stellt das WSMM allerdings die *fortlaufende Anwendung der Wertstrommethode* dar, sprich die kontinuierliche Anwendung ebenjener, die Durchführung von Verbesserungsmaßnahmen sowie die Überwachung des Implementierungserfolgs. Basierend auf dieser Definition werden im Folgenden die Grundlagen der Wertstrommethode präsentiert.

### 2.2.2 Einführung in die Wertstrommethode

Die *Wertstrommethode* (WSM) ist eine bewährte und in der industriellen Praxis regelmäßig angewandte Methode [HÄMM10]. Ziel ist es, systematisch Verschwendung im *Wertstrom* aufzudecken und diese im Rahmen einer Neugestaltung – der Definition eines Soll-Zustandes – zu eliminieren [ROTH99]. Der Wertstrom umfasst dabei alle Tätigkeiten,

die notwendig sind, um Rohmaterial in ein fertiges Produkt umzuwandeln [ERLA20]. In den letzten Jahren hat die WSM in der Industrie breite Anwendung gefunden und gilt als präferiertes Mittel, um eine schlanke Produktion in Unternehmen zu etablieren [GREW08]. Eine im Jahr 2010 durchgeführte Studie zeigte, dass 60 % von 301 befragten Unternehmen die WSM anwenden [HÄMM10]. Im Jahr 2017 ergab eine Studie, dass 86 % der Befragten (n=170) aktuell mit der WSM arbeiten [WINK17].

Die Literatur zur WSM sowie bestehende Weiterentwicklungen der Methode basieren hierbei auf drei zentralen Grundlagenwerken der WSM: ROTHER UND SHOOK [ROTH99], ERLACH [ERLA20] und KLEVERS [KLEV07]. Jedoch variiert das Vorgehen innerhalb der jeweiligen Phasen je nach verwendeter Quelle [KAIS19], was insbesondere auf den iterativen Charakter der Methode zurückzuführen ist. Aus diesem Grund und der Relevanz der Methode für die industrielle Praxis wurde im Jahr 2020 die *DIN ISO-Norm 22468* veröffentlicht, welche die Anwendung der Methode unterstützen soll [DIN20]. Der Norm folgend besteht die WSM aus den drei Phasen der *Wertstromanalyse* (WSA), dem *Wertstromdesign* (WSD) sowie der *Wertstromplanung* (WSP). Eine schematische Darstellung der drei Phasen ist in Abbildung 4 dargestellt [DIN20].

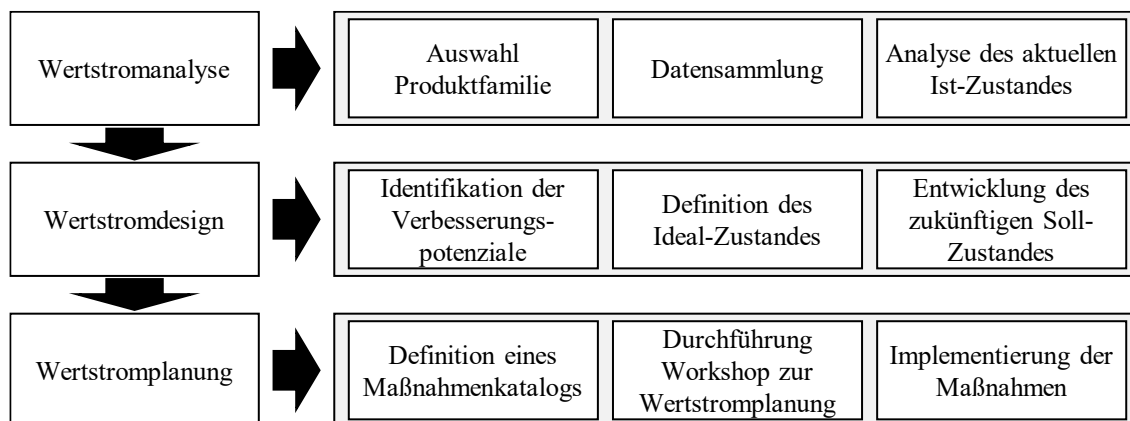


Abbildung 4: Phasen der Wertstrommethode (Eigene Darstellung in Anlehnung an [DIN20])

Hierbei wird betont, dass sich die WSM als Teil des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses in den *PDCA-Zyklus* (*Plan, Do, Check, Act*) einordnen lässt [DIN20]. Beginnend mit der *Planungsphase* (*Plan*) werden Ziele und Maßnahmen zur Verbesserung geplant. In der darauffolgenden *Durchführungsphase* (*Do*) werden die geplanten Maßnahmen implementiert. In der *Überprüfungsphase* (*Check*) wird analysiert, inwiefern die umgesetzten Maßnahmen zum Erfolg beigetragen haben. Abschließend werden in der *Aktionsphase* (*Act*) notwendige Anpassungen vorgenommen. Dieser Zyklus wird erneut durchlaufen, um die kontinuierliche Verbesserung des Wertstroms zu gewährleisten. [DEMI18] Während die Phasen *Plan* und *Do* im Rahmen der WSM abgedeckt werden, sind die Phasen *Check* und *Act* durch die für die Methode charakteristische Momentaufnahme nicht realisierbar (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Hierzu sind eine kontinuierliche Überwachung und Anpassung notwendig, welche ohne zusätzliche Hilfsmittel zum jetzigen



Zeitpunkt nicht realisierbar sind. [ERLA23] Die im Folgenden erläuterte Vorgehensweise orientiert sich an der DIN ISO-Norm 22468 [DIN20].

### 2.2.2.1 Wertstromanalyse

Die Wertstromanalyse ist unterteilt in die drei Phasen *Auswahl Produktfamilie*, die *Datensammlung* und die *Analyse des aktuellen Ist-Zustandes*.

#### **Auswahl Produktfamilie**

Die erste Phase beschreibt die Auswahl der Produktfamilie. Dabei werden die Produkte hinsichtlich der Ähnlichkeiten in ihren Produktionsprozessen in Produktfamilien unterteilt [ERLA20] und sollten folgende Eigenschaften aufweisen:

- identische bzw. ähnliche Produktionsprozessabläufe der Produktvarianten,
- repräsentatives Produkt mit strategischer Relevanz für das Unternehmen
- möglichst ausgeglichene Auftrags- bzw. Bearbeitungsvolumina und keine bzw. geringe Variation in den Taktzeiten [DIN20]

Durch diese Segmentierung wird eine Gliederung des Produktspektrums erreicht und eine Aufnahme des Wertstroms je Produktfamilie ermöglicht [ROTH99].

#### **Datensammlung**

Im zweiten Schritt findet für die ausgewählte Produktfamilie die Sammlung wertstromrelevanter Daten statt [DIN20]. Abbildung 5 zeigt die wesentlichen Schritte zur Erfassung der Informationen des aktuellen Ist-Zustandes.

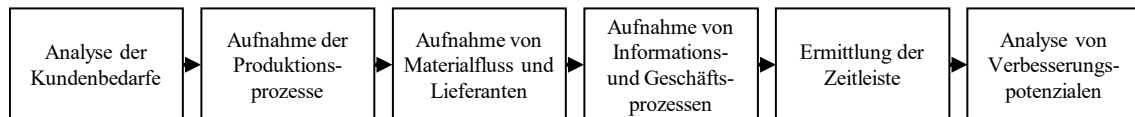


Abbildung 5: Schritte der Datensammlung (Eigene Darstellung in Anlehnung an [ERLA20])

Grundsätzlich geht man konträr zu dem Materialfluss vor, d.h. stromaufwärts, da dies eine durchgängige Kundenorientierung bedingt [KLEV07]. Folglich werden als erstes die *Kundenbedarfe analysiert*. Anschließend werden die *Produktionsprozesse sowie zugehörige Prozessparameter aufgenommen*. Hierzu zählen bspw. die Prozesszeit, die Zykluszeit je Produkt, die Rüstzeit, die Gesamtanlagenverfügbarkeit, die Losgröße oder die Anzahl der Mitarbeitenden [LUGE19b]<sup>2</sup>. Ebenso wie die im darauffolgenden Schritt ermittelten *Daten von Materialfluss und Lieferanten* – bspw. Wiederbeschaffungszeit der Rohmaterialien, Losgröße oder Bestände – werden die Daten direkt in der Produktion während einer Begehung am Ort der Wertschöpfung erfasst [KLEV07]. Im Anschluss werden die *Informations- und Geschäftsprozesse* bestimmt und aus Sicht der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) abgebildet. Diese können sowohl in analoger als auch

<sup>2</sup> Weitere Prozessparameter finden sich in Anhang A3 der DIN ISO-Norm 22468 [DIN20].

in digitaler Form erfolgen. [ERLA20] Schließlich wird die *Zeitleiste ermittelt*. Dabei wird der Flussgrad der Produktion bestimmt, welcher laut [ERLA20] als „Maß für die Dynamik der Produktion“ verstanden werden kann<sup>3</sup>. Weiterhin wird an dieser Stelle der rechnerische Kundentakt berechnet, indem die zur Verfügung stehende Arbeitszeit durch den Kundenbedarf in einem definierten Zeitraum, bspw. einem Kalenderjahr, dividiert wird [DIN20]. Dabei ist der Kundentakt die vom Markt vorgegebene Schlagzahl, mit der die Produktion idealerweise die Produkte herstellt [ERLA20]. Im letzten Schritt werden während der Vor-Ort-Begehung *Verbesserungspotenziale analysiert* und systematisch für den folgenden Schritt dokumentiert [ROTH99].

### Analyse des aktuellen Ist-Zustandes

Nach der Datensammlung werden die erfassten Prozessgrößen übersichtlich in einer Wertstromkarte aufgetragen (vgl. Abbildung 6) [DIN20].

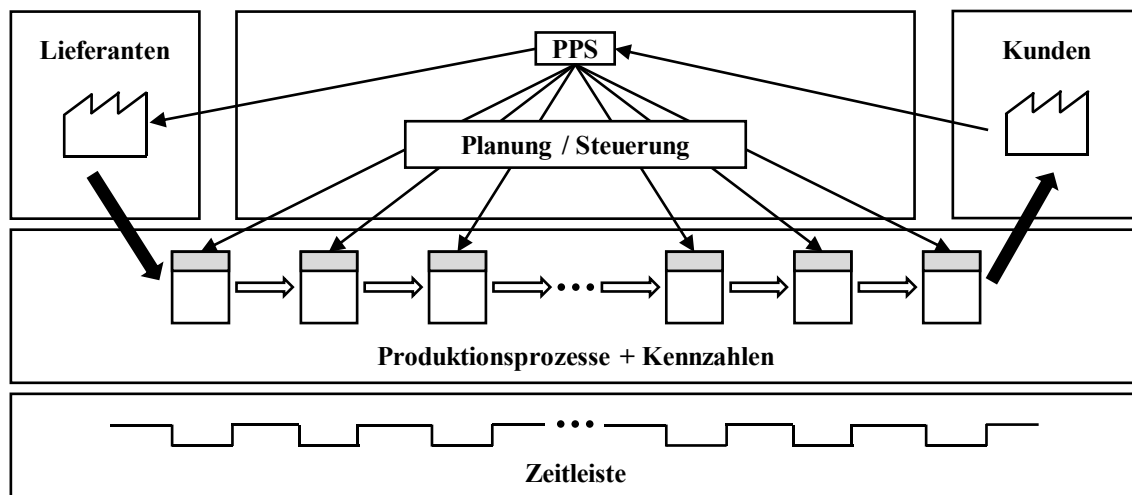


Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Wertstromkarte (Eigene Darstellung in Anlehnung an [DIN20, ROTH99]).

Die Wertstromkarte wird dabei in fünf Bereiche eingeteilt. Oben rechts werden die *Kunden* eingezeichnet und spezifische Informationen, bspw. die betrachtete Produktfamilie, der Kundentakt oder die Anzahl an Varianten, aufgeführt. Oben links werden die *Lieferanten* und spezifische Informationen, bspw. die Lieferfrequenz, eingezeichnet. Verbunden werden beide Bereiche durch die *Produktionsplanung und -steuerung (PPS)*, welche für den Informationsfluss zur Planung und Steuerung des Wertstroms zuständig ist. Unterhalb der drei Bereiche finden sich die *Produktionsprozesse*. Hier wird der Materialfluss, bestehend aus den einzelnen Produktionsprozessen – ein Prozess wird als rechteckiger Kasten visualisiert – sowie den Prozessverbindungen, dargestellt. Die während der Datensammlung ermittelten Kennzahlen werden in die jeweiligen Kästen der

<sup>3</sup> Der Flussgrad errechnet sich als Quotient von Prozesszeit und Durchlaufzeit, normiert über die tägliche Arbeitszeit [ERLA20].

Prozesse eingetragen. Unterhalb dieses Bereichs ist die *Zeitleiste* mit der Durchlaufzeit und den Prozesszeiten aufgetragen. [DIN20, ERLA20, KLEV07, ROTH99].

Da die Wertstromkarte sowohl für die Wertstromanalyse als auch das folgende Wertstromdesign verwendet wird, ist eine Grundlage zur Anwendung der standardisierten Symbolik. Eine Übersicht der verschiedenen Symbole findet sich in Anhang A.1 [DIN20]. Mithilfe der standardisierten Symbole und der Grundstruktur der Wertstromkarte wird ein *vereinfachtes Abbild der Realität* bspw. auf einem DIN A3-Blatt realisiert. Dieses Abbild wird im folgenden Wertstromdesign als Ausgangsbasis für die Entwicklung des zukünftigen Soll-Zustands des Wertstroms verwendet [LUGE17b].

### 2.2.2.2 Wertstromdesign

Das Wertstromdesign ist unterteilt in die drei Phasen *Identifikation der Verbesserungspotenziale*, die *Definition des Ideal-Zustandes* und die *Entwicklung des zukünftigen Soll-Zustandes*. Nachstehend werden die wichtigsten Aspekte veranschaulicht.

#### **Identifikation der Verbesserungspotenziale**

Ziel des Wertstromdesigns ist eine Neu- bzw. Umgestaltung der Produktion, die am Kunden orientiert und effizient gestaltet ist [ERLA20]. Unter Berücksichtigung der sieben Arten der Verschwendung<sup>4</sup> nach [ÖNO13] wird versucht, die im Rahmen der WSA identifizierten Verbesserungspotenziale in Bezug auf den Material- und Informationsfluss umzusetzen [DIN20]. Durch die Erfassung der Probleme am Ort der Wertschöpfung und die übersichtliche Darstellung mithilfe von Kaizen-Blitzen auf der Wertstromkarte wird die Transparenz entlang des Wertstroms erhöht [ROTH99]. Hierdurch können zielgerichtet Sofortmaßnahmen für individuelle Probleme definiert und die sog. „Low Hanging Fruits“, kostengünstige und aufwandsarme Lösungen für vergleichsweise hohen Ertrag, abgearbeitet werden [ERLA20], bevor im folgenden Schritt mit der Definition eines Ideal-Zustandes für die Produktion gestartet wird.

#### **Definition des Ideal-Zustandes**

Im zweiten Schritt wird eine Vision für die Produktion erarbeitet, welche einen verschwendungsfreien Ablauf des betrachteten Wertstroms darstellt. Bei der Entwicklung wird sich weitestgehend vom Ist-Zustand und den bestehenden Restriktionen gelöst, um einen Ideal-Zustand, den sog. Nordstern, darzustellen. [KLEV07] Dieser muss dabei zwingend von Personen mit weitgehender Lean-Expertise konzipiert werden [LIKE06]. Der Nordstern soll als Orientierung und Leitbild dienen und gewährleisten, dass Umsetzungsbemühungen auf tatsächliche Bedürfnisse ausgerichtet werden und nicht auf verschiedene Ideen, was getan werden könnte. [ROTH13]. Abbildung 7 visualisiert die Rolle des Ideal-Zustandes für die Weiterentwicklung eines Wertstroms.

---

<sup>4</sup> Bei den sieben Arten der Verschwendung handelt es sich um: Überproduktion, Transport, Wartezeiten, Ausschuss/Nacharbeit, Bewegung, Unnötige Bearbeitungsschritte [ÖNO13].

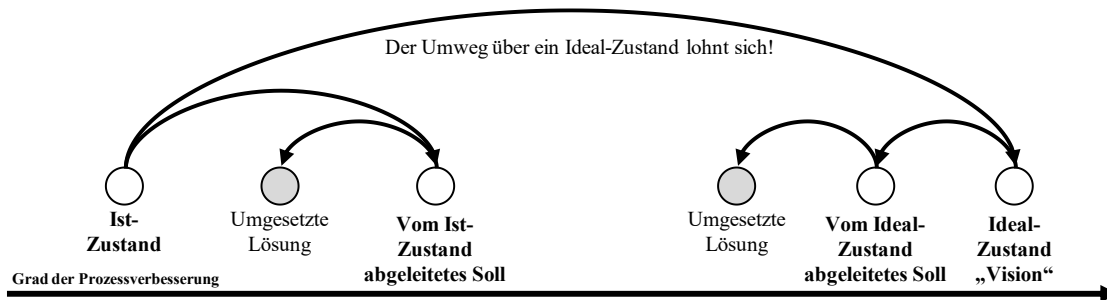


Abbildung 7: Die Rolle des Ideal-Zustandes (Eigene Darstellung in Anlehnung an [LIND19])

### Entwicklung des zukünftigen Soll-Zustandes

Der zukünftige, verbesserte Soll-Zustand wird mithilfe der acht nachstehenden Gestaltungsrichtlinien entworfen [DIN20]:

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1. Taktzeit am Schrittmacher-Prozess | 5. Festlegung Schrittmacher-Prozess  |
| 2. Supermarkt bzw. Direktversand     | 6. Ausgleich des Produktmixes am Schrittmacher-Prozess                         |
| 3. Kontinuierlicher Produktfluss     | 7. Produktfreigabe am Schrittmacher-Prozess                                    |
| 4. Supermarkt-Pull-Systeme           | 8. Weitere Verbesserungen im Sinne des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses |

Die Anwendung der Gestaltungsrichtlinien ist nicht als strikte Reihenfolge zu verstehen, sondern als Unterstützung für eine iterative Umsetzung [LIKE06]. Eine Untersuchung von KAISER ET AL. hat ergeben, dass die drei Grundlagenwerke [ROTH99, KLEV07, ERLA20] zwar die gleichen Gestaltungsdimensionen beinhalten, die sequenzielle Abfolge jedoch variiert [KAIS19]. Ein detailliertes Vorgehen zur Entwicklung des zukünftigen Soll-Zustandes kann [ERLA20] entnommen werden.

#### 2.2.2.3 Wertstromplanung

Die Phase der Wertstromplanung besteht aus der *Definition eines Maßnahmenkatalogs*, der *Durchführung eines Workshops zur Wertstromplanung* sowie der letztendlichen *Implementierung der Maßnahmen*.

#### Definition eines Maßnahmenkatalogs

Für die Dokumentation der Verbesserungsmaßnahmen, die zur Umsetzung des entwickelten zukünftigen Soll-Zustandes notwendig sind, eignet sich ein Maßnahmenkatalog. In diesem werden die einzelnen Maßnahmen definiert, terminiert und mit Verantwortlichkeiten versehen. [DIN20] Es empfiehlt sich, den Wertstrom in Abschnitte zu zerlegen und die Maßnahmen auf die jeweiligen Abschnitte zu verteilen, sodass eine zeitnahe Umsetzung schrittweise direkt in der laufenden Produktion erfolgen kann [ERLA20].

#### Durchführung Workshop zur Wertstromplanung

Im Anschluss wird der Maßnahmenplan innerhalb des Unternehmens im Rahmen eines Workshops den verantwortlichen Mitarbeitenden kommuniziert und diskutiert. Ziel ist es,

die Risiken der vorgeschlagenen Änderungen zu ermitteln und bei Bedarf Anpassungen vorzunehmen. Mit dieser Phase endet die *Plan-Phase* des PDCA-Zyklus. [DIN20]

### **Implementierung der Maßnahmen**

Im letzten Schritt der WSM werden die definierten Maßnahmen von den verantwortlichen Personen im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) im Unternehmen umgesetzt (*Do-Phase* des PDCA-Zyklus) [DIN20]. Der übliche Zeithorizont zur Realisierung des neuen Soll-Zustandes liegt je nach Komplexität und Anzahl der Maßnahmen zwischen wenigen Monaten [VDI12] und bis zu 18 Monaten [ROTH99].

### 2.2.3 Stärken und Schwächen der Wertstrommethode

Da es sich bei der WSM um eine in der Praxis weit verbreitete Methode handelt [HÄMM10, WINK17], sind sowohl die Stärken als auch Schwächen bei der Anwendung umfangreich diskutiert und dokumentiert. Im Folgenden werden diese aus der Literatur abgeleitet und zusammengefasst. Ferner bilden die aufgeführten Schwächen die Basis für die Weiterentwicklung im Rahmen dieser Arbeit.

#### 2.2.3.1 Stärken der Wertstrommethode in der industriellen Praxis

Die WSM zeichnet sich durch ihre *einheitliche und standardisierte Symbolik zur Visualisierung des Material- und Informationsflusses* aus [SERR08, SOLD09, FORN14, LUGE17a, SHOU17]. Es wird ein leichtes und trotzdem umfassendes Verständnis der Produktion ermöglicht. Dadurch stellt die WSM die gemeinsame Grundlage für die innerbetriebliche Kommunikation dar [ERLA20], und trägt somit entscheidend zur *Erhöhung der Transparenz im Unternehmen* bei [SOLD09, HÄMM10, FORN14, LUGE17a, SHOU17, URIA18]. Durch die gewonnene Transparenz wird zum einen eine umfangreiche *Identifikation von Verschwendung* entlang der betrachteten Produktionsprozesse ermöglicht [SERR08, FORN14, LUGE17a, SHOU17, WAGN18, KNOL19] und zum anderen die *Identifikation von Verbesserungspotenzialen* unterstützt [SERR08, LUGE17a, SHOU17, URIA18, WAGN18, KNOL19]. Durch die *einfache Anwendbarkeit* wird weiterhin die *hohe Akzeptanz der Ergebnisse gefördert* [SOLD09, LUGE17a, URIA18]. Ein Blick in die beiden Literaturanalysen von [ROME17] und [SHOU17] sowie die Studie von [HÄMM10] zeigt, dass Verbesserungen insbesondere in der Reduktion der Bestände, der Durchlaufzeit sowie der Erhöhung von Produktivität und Wertschöpfungsanteil erzielt werden. Diese quantitativen Verbesserungen bedingen automatisch, dass die *Ausrichtung des Wertstroms am Kunden forciert wird* [SOLD09, HÄMM10, LUGE17a, WAGN18], eines der zentralen Ziele eines schlanken Produktionssystems. Neben den genannten Stärken der klassischen WSM wurde in den letzten Jahren identifiziert, dass die *Kombination mit Industrie 4.0-Technologien eine detaillierte Betrachtung des Wertstroms ermöglicht* [LUGE17a, SHOU17, URIA18]. Tabelle 1 fasst die identifizierten Stärken der klassischen WSM zusammen.

Tabelle 1: Stärken der Wertstrommethode

Nr.	Stärken der Wertstrommethode	Quellen
1	Einheitliche und standardisierte Symbolik zur Visualisierung des Material- und Informationsflusses	[SERR08, SOLD09, FORN14, LUGE17a, SHOU17]
2	Erhöhung der Transparenz im Unternehmen	[SOLD09, HÄMM10, FORN14, LUGE17a, SHOU17, UR1A18]
3	Identifikation von Verschwendung	[SERR08, FORN14, LUGE17a, SHOU17, WAGN18, KNOL19]
4	Identifikation von Verbesserungspotenzialen	[SERR08, LUGE17a, SHOU17, UR1A18, WAGN18, KNOL19]
5	Einfache Anwendbarkeit fördert hohe Akzeptanz der Ergebnisse	[SOLD09, LUGE17a, UR1A18]
6	Ausrichtung des Wertstroms am Kunden wird forciert	[SOLD09, HÄMM10, LUGE17a, WAGN18]
7	Kombination mit Industrie 4.0-Technologien ermöglicht detaillierte Betrachtung des Wertstroms	[LUGE17a, SHOU17, UR1A18]

Neben den Stärken der WSM existieren auch Schwächen bei der Anwendung in der Praxis, welche in Literatur- und Anwendungsfallanalysen sowie Studien ermittelt worden sind [LUGE19a].

### 2.2.3.2 Schwächen der Wertstrommethode in der industriellen Praxis

Als größte Schwäche wird kritisiert, dass das *Abbild nur eine Momentaufnahme* des Wertstroms darstellt, da die Wertstromanalyse *auf einer einmaligen Datenaufnahme vor Ort basiert* [BRAG09, SOLD09, HÄMM10, LUGE17a, UR1A18, KNOL19]. Aus diesem Grund handelt es sich um eine *statische Methode, welche die dynamische Veränderung des Wertstroms nicht berücksichtigt* [FORN14, LUGE17a, KNOL19]. Bei der Datenaufnahme muss demnach immer hinterfragt werden, ob der aufgenommene Zustand einen Normalzustand darstellt [KLEV13]. Der statische Charakter steht der wachsenden Flexibilität der Kundenanforderungen gegenüber, was sie ohne Anpassungen nicht zukunftsfähig macht [ERLA20]. Ebenso erfährt die WSM *eingeschränkte Anwendbarkeit bei komplexen Produkten oder Produkten mit hoher Variantenzahl* [BRAG09, HÄMM10, FORN14, SHOU17, UR1A18, KNOL19]. Dies ist insbesondere durch die Komplexitätsreduktion im Prozessfluss bedingt, welche darauf abzielt, ein besseres Verständnis zu ermöglichen, jedoch Ungenauigkeiten in der Darstellung zur Folge hat [ROTH99]. Weiterhin ist es mithilfe der WSM nicht möglich, *automatisiert konkrete Verbesserungsideen* für ermittelte Probleme *vorzuschlagen* [SHOU17, UR1A18], sodass eine datenbasierte Unterstützung bei der Entscheidungsfindung nicht möglich ist. Die Abwägung verschiedener Design-Alternativen [KAIS19] und die *Auswahl des optimalen Szenarios basierend auf Daten wird nicht unterstützt* [RAMA16, LIU20]. Die Schwächen zeigen, dass die WSM aufgrund der fehlenden Fähigkeit, kontinuierlich Daten zu erfassen und zu analysieren, zum aktuellen Zeitpunkt nicht die Phasen *Check* und *Act* des PDCA-Zyklus unterstützen kann. Somit ist die Anwendung der WSM in dynamischen Produktionsumgebungen limitiert und es besteht ein bisher ungenutztes Potenzial an dieser Stelle. Tabelle 2 fasst die identifizierten Schwächen der WSM zusammen.

Tabelle 2: Schwächen der Wertstrommethode

Nr.	Schwächen der Wertstrommethode	Quellen
1	Abbild stellt nur eine Momentaufnahme dar, da Wertstromanalyse auf einmaliger Datenaufnahme vor Ort basiert	[BRAG09, SOLD09, HÄMM10, LUGE17a, UR1A18, KNOL19]
2	Statische Methode, welche die dynamische Veränderung des Wertstroms nicht berücksichtigt	[FORN14, LUGE17a, KNOL19]
3	Eingeschränkte Anwendbarkeit bei komplexen Produkten oder Produkten mit hoher Variantenzahl	[BRAG09, HÄMM10, FORN14, SHOU17, UR1A18, KNOL19]
4	Kein Vorschlag konkreter Verbesserungsideen	[SHOU17, UR1A18]
5	Auswahl des optimalen Szenarios basierend auf Daten nicht unterstützt	[RAMA16, LIU20]

#### 2.2.4 Weiterentwicklungsbedarfe der Wertstrommethode

Obwohl dynamische Veränderungen im Wertstrom existieren [BENN14, LEE14, TÜRC14], werden diese durch die WSM bisher nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). In der Folge werden die an dieser Stelle bestehenden Herausforderungen weiter diskutiert und Weiterentwicklungsbedarfe abgeleitet.

Ein Produktionssystem wird durch interne und externe Einflussgrößen beeinflusst, deren Zustand sich im Zeitverlauf ändert. Anknüpfend hieran zeigt Abbildung 8 eine Übersicht möglicher Einflussgrößen, deren zeitveränderlicher Zustände von der WSM nicht dokumentiert werden.

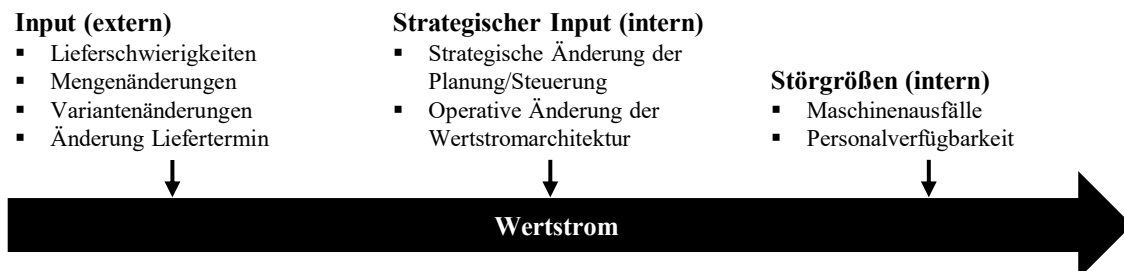


Abbildung 8: Dynamische Einflussgrößen auf den Wertstrom (Eigene Darstellung in Anlehnung an [LUGE19b])

Externe Faktoren werden hierbei unmittelbar von den Kunden – z. B. *Mengen-, Variantenänderungen* oder eine *Änderung des Liefertermins* – oder den Lieferanten – z. B. *Lieferschwierigkeiten* – bestimmt. [TÜRC14, WEST14] Interne Faktoren können zum einen Störgrößen sein, die den operativen Ablauf stören – z. B. *Maschinenausfälle* oder *Personalverfügbarkeit* [WILD04] – zum anderen kann sich der strategische Input – z. B. eine *strategische Änderung der Planung / Steuerung* oder eine *operative Änderung der Wertstromarchitektur* [LUGE19b] – ändern. Um diese Einflussgrößen in Zukunft mit geringerem Aufwand adressieren zu können, ist die Weiterentwicklung der statischen WSM zu einem ganzheitlichen Management-Ansatz im Sinne des WSMMs (vgl. Abschnitt 2.2.1) notwendig. Die kontinuierliche Planung, Steuerung und Kontrolle des Wertstroms ermöglicht es, die dynamischen Einflussgrößen auf einen Wertstrom jederzeit zu überprüfen und Anpassungen vorzunehmen [LUGE19b]. Auf diese Weise wird sichergestellt,

dass in Zukunft nicht ausschließlich die Phasen *Plan* und *Do* des PDCA-Zyklus durchgeführt werden, sondern die WSM um die Phasen *Check* und *Act* erweitert wird, wodurch die kontinuierliche Verbesserung des Wertstroms unterstützt wird. Diese Weiterentwicklung ist insbesondere vor dem Hintergrund des Wandels von schlanken zu cyberphysischen Produktionssystemen von zentraler Bedeutung. Die zunehmende Digitalisierung der Produktionssysteme eröffnet neue Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der WSM. Zum Zeitpunkt der ursprünglichen Entwicklung der WSM existierte noch keine verlässliche und umfassende Digitalisierung der Informationen in der Produktion, weshalb die Datenerfassung in einer Begehung am Ort der Wertschöpfung stattfinden musste [URNA23b]. Heutzutage ermöglichen digitale Technologien, die in Abschnitt 2.2.2.3 genannten Schwächen zu adressieren und die WSM zu einem weiterhin für die Industrie relevanten Management-Ansatz weiterzuentwickeln. Hierzu identifizieren WINKLER UND LUGERT in ihrer Studie diverse Möglichkeiten, wie die WSM unter Zuhilfenahme von Industrie 4.0-Technologien weiterentwickelt werden kann, was die Relevanz des Ansatzes im Kontext cyberphysischer Produktionsumgebungen unterstreicht (vgl. Abbildung 9) [WINK17]. Dabei wird der *Simulation des Wertstromdesigns* von den Expert:innen mit 68,3 % das größte Potenzial zugewiesen. Die folgenden Nennungen, wie z.B. die *Einbeziehung von Maschinendaten*, eine *Schnittstelle zu Enterprise Resource Planning (ERP)-/Manufacturing Execution-Systemen (MES)* oder die *digitale Darstellung des Wertstromdesigns*, sind dem Themenbereich Digitalisierung zuzuordnen. Die Digitalisierung der WSM soll eine aufwandsarme Datenanbindung sowie Aktualisierung des Wertstromabbildes ermöglichen. Offen bleiben in diesem Kontext jedoch die Fragen, *wie die verfügbaren Daten extrahiert und miteinander verknüpft werden können und auf welche Weise die gewonnenen Informationen präsentiert werden müssen* [WOLL22].

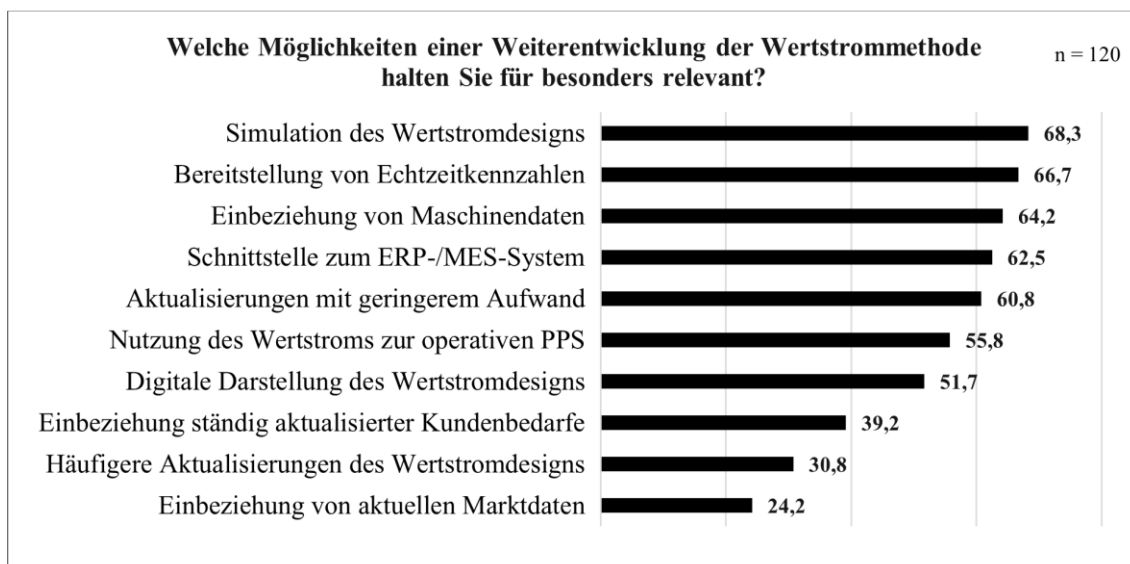


Abbildung 9: Weiterentwicklungsbedarfe der Wertstrommethode (Quelle: [WINK17])

Aus den zwei Einflussrichtungen – die *Dynamisierung* des Wertstroms und die *Digitalisierung* der Methode – auf die *statische WSM* ergibt sich aus Sicht der industriellen Praxis



zum einen der Weiterentwicklungsbedarf hin zu einem ganzheitlichen Management-Ansatz, dem *Wertstrommanagement*, und zum anderen der Bedarf nach einer *digitalisierten Wertstrommethode*. Die Synthese beider Entwicklungen, das sog. *datenbasierte Wertstrommanagement*, besitzt das Potenzial, die Nachteile der WSM zu adressieren sowie die Vorteile der Methode zu stärken und adressiert somit den Weiterentwicklungsbedarf der statischen Wertstrommethode (vgl. Abbildung 10).

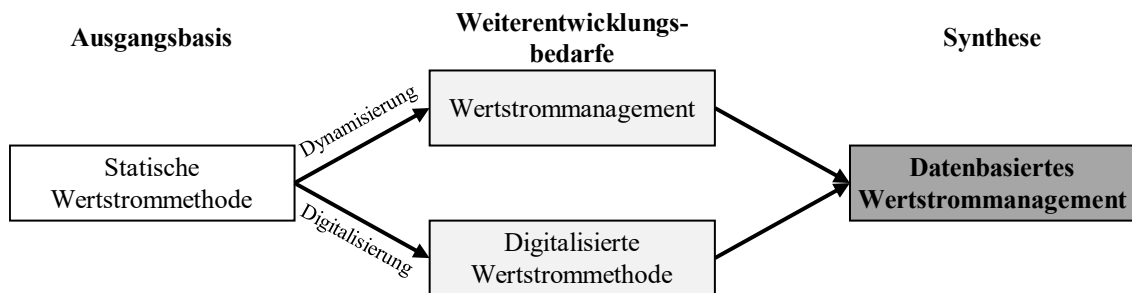


Abbildung 10: Weiterentwicklungsrichtungen der Wertstrommethode (Eigene Darstellung in Anlehnung an [LUGE19b])

## 2.2.5 Bestehende Weiterentwicklungsansätze

Nachdem der Weiterentwicklungsbedarf der WSM ermittelt wurde, erfolgt nachstehend eine Analyse der bereits existierenden Weiterentwicklungsansätze im Bereich des WSMMs (Abschnitt 2.2.5.1) sowie der Integration der Digitalisierung in die WSM (Abschnitt 2.2.5.2).

### 2.2.5.1 Weiterentwicklungsansätze des Wertstrommanagements

In der Literatur konnten insgesamt fünf Ansätze identifiziert werden, die sich mit der Weiterentwicklung der WSM zu einem Management-Ansatz befassen.

SPALT ET AL. verstehen unter WSMM ein Vorgehen, das grundsätzlich an die WSM anknüpft. Die Konzeption des Wertstromdesigns basiert neben den Ergebnissen aus der Wertstromanalyse auf der strategischen Ausrichtung des Unternehmens. Diese wird im Austausch der Führungskräfte entwickelt, wobei die strategischen Ziele des Unternehmens sowie die Umwelteinflüsse berücksichtigt werden. Dabei wird der *Fokus von lokalen Rampe-zu-Rampe-Wertstromprojekten auf Wertschöpfungsnetzwerke erweitert*. [SPAL13] Für HINES ET AL. ist WSMM ein strategischer und operativer Ansatz, der Unternehmen in einen Lean-Zustand überführen soll. Der ganzheitliche Ansatz beruht auf der WSM und wurde zu einem dreistufigen Management-Ansatz weiterentwickelt, der die *Management-Ebene direkt in die operative Ebene einbindet*. Die strategische Ausrichtung des Unternehmens wird unmittelbar in umsetzbare Maßnahmen auf dem Shopfloor überführt und ein Soll/Ist-Vergleich ermöglicht eine frühzeitige Erkennung von Abweichungen. [HINE98] Nach ERLACH ist das übergeordnete Ziel des WSMMs die *fortlaufende Anpassung und Verbesserung eines Wertstroms während des Fabrikbetriebs*. Aufgabe des WSMMs ist dabei die Bewertung und Koordination der

Verbesserungsmaßnahmen. Dabei nimmt das Wertstrommonitoring mit der kontinuierlichen Überwachung und Bewertung der Wertstromleistung auf der Grundlage von Kennzahlen die zentrale Steuerungsfunktion ein. Demnach ist die regelmäßige Durchführung von Wertstromanalyse und -design zentraler Bestandteil. [ERLA20] An dieser Stelle knüpft LUGERT mit seinem Konzept zum *dynamischen Wertstrommanagement* an. Mithilfe einer Datenaufnahme in Echtzeit wird ein ständig aktualisiertes Wertstromabbild ermöglicht und bildet die Grundlage für Analysen und Simulationen. Auf diese Weise wird der projektbezogene Charakter der Wertstromanalyse aufgehoben und durch eine kontinuierliche Analyse ersetzt. [LUGE19b] Auch AHMAD ET AL. verwenden eine *kontinuierliche Datenaufnahme auf Basis eines ERP-Systems* zur Erzeugung eines aktuellen Wertstromabbildes [AHMA18]. Eine Erklärung, wie die Datenanbindung in der Praxis umgesetzt wird, bleiben beide Ansätze schuldig und zeigen lediglich die Möglichkeit auf. Eine Zusammenfassung der identifizierten Weiterentwicklungsansätze findet sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: Weiterentwicklungsansätze des Wertstrommanagements

<b>Autor:innen</b>	<b>Jahr</b>	<b>Titel</b>	<b>Quelle</b>
Spalt et al.	2013	Globales Wertstrommanagement	[SPAL13]
Hines et al.	1998	Value Stream Management	[HINE98]
Erlach	2020	Wertstromdesign	[ERLA20]
Lugert	2019	Dynamisches Wertstrommanagement im Kontext von Industrie 4.0	[LUGE19b]
Ahmad et al.	2018	Alberta Learning Factory for training reconfigurable assembly process value stream mapping	[AHMA18]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Weiterentwicklungsansätze zur Realisierung eines WSMMs in der Literatur existieren. Teilweise werden diese auch bereits durch Industrie 4.0-Technologien erweitert, um eine kontinuierliche Analyse des Ist-Zustandes zu ermöglichen. Die Ansätze gehen jedoch nicht über einen konzeptionellen Ansatz hinaus, sodass nicht ersichtlich ist, wie eine Umsetzung in der industriellen Praxis unterstützt werden kann. Eine eindeutige Definition der Aufgaben des WSMMs sowie praktische Leitlinien zur Umsetzung fehlen zum aktuellen Zeitpunkt.

### 2.2.5.2 Weiterentwicklungsansätze zur Integration der Digitalisierung in die Wertstrommethode

In der Literatur werden zwei grundsätzliche Weiterentwicklungsrichtungen bei der Integration der Digitalisierung in die WSM unterschieden [ERLA21]:

1. Wertstrommethode für die digitalisierte Produktion
2. Digitalisierung der Wertstrommethode

#### **Wertstrommethode für die digitalisierte Produktion**

Die erste Richtung befasst sich mit der Befähigung der konventionellen Wertstrommethode für die Anwendung im Kontext eines cyberphysischen Produktionssystems (CPS).

Im Fokus steht hierbei die bessere Einbeziehung von Daten- und Informationsflüssen. Die Methode selbst bleibt dabei analog. [ERLA21]

In seiner Dissertation erweitert MEUDT die konventionelle Wertstromanalyse um den Aspekt der Informationsflüsse im direkten und indirekten Bereich. Dadurch werden Medienbrüche zwischen sog. Speichermedien (Papier, Mitarbeitende, IT-Systeme etc.) visualisiert und Verschwendungen im Umgang mit Daten und Informationen sichtbar. Damit wird die Möglichkeit gegeben, informationslogistische Verschwendungen zu analysieren und im Sinne der schlanken Produktion zu reduzieren. [MEUD20] An diese Erweiterung knüpft HARTMANN an, der im Rahmen seiner Dissertation das konventionelle Wertstromdesign um den Aspekt der Informationsflüsse erweitert. Das Vorgehen ermöglicht es, dass Anforderungen und Potenziale der Digitalisierung und Industrie 4.0 im Rahmen der Gestaltung eines Wertstroms berücksichtigt werden. [HART21] Beide Ansätze werden von METTERNICH ET AL. in ihrem Buch „Wertstrom 4.0“ zu einem Ansatz vereint, der es im Kontext digitaler Geschäftsmodelle ermöglicht, einen neuen Soll-Zustand für die gesamte Auftragsabwicklung zu entwerfen. Mit dem neuen Ansatz steht nicht mehr der Materialfluss im Mittelpunkt der Verbesserungsaktivitäten, sondern auch alle Informationsflüsse eines Wertstroms werden mitbetrachtet. [METT22]

### **Digitalisierung der Wertstrommethode**

Die zweite Weiterentwicklungsrichtung befasst sich hingegen mit der Digitalisierung der Wertstrommethode an sich [ERLA21]. Die identifizierten Ansätze lassen sich zusätzlich unterteilen in die Kategorien *Technologie* und *Konzept*.

Im Bereich der *Technologie* sind Ansätze zusammengefasst, die eine Erweiterung der WSM unter Zuhilfenahme einer Industrie 4.0-Technologie vornehmen. RAMADAN entwickelt im Rahmen seiner Dissertation ein Rahmenwerk für die Implementierung eines echtzeitfähigen dynamischen WSMs durch Verwendung der RFID-Technologie (engl.: Radio-Frequency Identification). Eine Integration in bestehende IT-Systeme sowie die Datennutzung aus unterschiedlichen IT-Systemen wird nicht berücksichtigt. [RAMA16] SULLIVAN ET AL. verfolgen einen ähnlichen Ansatz. Anstelle der RFID-Technologie verwenden die Autor:innen ein UWB-Echtzeit-Lokalisierungssystem (engl.: Ultra-Wide Band) zur Erzeugung einer digitalen, sich kontinuierlich aktualisierenden Wertstromkarte. Diese ist in der Lage, zeitbasierte Kennzahlen, wie bspw. Zyklus- oder Liegezeiten, produktspezifisch zu ermitteln und darzustellen. [SULL22] TREBUNA ET AL. hingegen nutzen eine Simulationssoftware, um eine digitale Wertstromkarte zu erzeugen. Dabei werden die relevanten Daten in der Produktion ermittelt und in ein Simulationsmodell übertragen. Dieses bildet sowohl den aktuellen Ist-Zustand als auch einen definierten Soll-Zustand ab. Die Simulation ermöglicht einen Vergleich zwischen Soll- und Ist-Zustand und die Definition gezielter Verbesserungsaktivitäten zur Erreichung des Soll-Zustands. [TREB19] URNAUER fokussiert sich in seiner Dissertation auf die Erweiterung der WSM durch Data-Analytics Anwendungen in den einzelnen Phasen der Analyse und des Designs. Je nach Phase wird auf unterschiedliche Data-Analytics-Anwendungen

zurückgegriffen, bspw. die Identifikation von Produktfamilien mittels Clusteranalyse oder die Wertstromsegmentierung mittels mathematischer Modellierung. Das Vorgehen ist dabei für die einmalige begleitende Anwendung ausgelegt und nicht für eine regelmäßige Anwendung im Kontext des WSMMs. Der Autor sieht dies jedoch als den nächsten Schritt im Rahmen der Weiterentwicklung der Methode an. [URNA23b]

Dem Bereich *Konzept* sind Ansätze zugeordnet, welche eine konzeptuelle Erweiterung der WSM durch Industrie 4.0-Technologien diskutieren, sich aber weder auf eine Technologie beschränken noch konkrete Handlungsempfehlungen für die praktische Umsetzung geben. BALAJI ET AL. stellen ein Konzept für die Erstellung einer dynamischen Wertstromkarte vor, welche auf der Implementierung eines Industrial Internet of Things (IIoT) beruht. Eine Erläuterung, wie die relevanten Datenpunkte und Kennzahlen ausgewählt und wie die Datenaufnahme in der Praxis umgesetzt werden kann, ist nicht gegeben. [BALA20] HORSTHOFER-RAUCH ET AL. analysieren in ihrem Artikel, welche Industrie 4.0-Technologien zu der Weiterentwicklung einer digitalisierten WSM beitragen. Hierbei wird Process Mining als vielversprechendste Technologie identifiziert. Damit eine Umsetzung in der Praxis gelingen kann müssen laut den Autor:innen eine Erweiterung der Methodenschritte stattfinden sowie die Datenspeicherung und Visualisierung untersucht werden. [HORS22] HUANG ET AL. entwickeln ein Multi-Agenten-System, welches auf Basis kostengünstiger Sensorik die Funktionsweise eines CPS imitiert und den Mehrwert einer sog. dynamischen Wertstromanalyse aufzeigt. Eine Umsetzung erfolgt anhand zweier Fallstudien. Aufgrund der fehlenden Detaillierung ist eine Anwendung des Multi-Agenten-Systems in einem Produktionsunternehmen nicht möglich. [HUAN19] LUGERT UND WINKLER identifizieren in ihrem Artikel Kernaspekte für die Weiterentwicklung der WSM zu der Vision eines dynamischen WSMMs. Dabei ist die Digitalisierung der Wertstrommethode in Form eines Digitalen Zwillinges zentrales Element der Überlegungen. Eine detaillierte Ausgestaltung, wie die Umsetzung in der Praxis zu erfolgen hat, findet nicht statt. [LUGE17b] TERIETE ET AL. entwickeln ein Konzept für ein eventbasiertes Rahmenwerk für eine digitalisierte Wertstromanalyse. Hierbei werden Daten aus unterschiedlichen IT-Systemen über eine zentrale Schnittstelle in eine zentrale Datenbank gesendet und für die weitere Verarbeitung in Form von Warnmeldungen, Berichten oder Visualisierungen vorbereitet. Wie bei den vorherigen Ansätzen, findet hier ebenfalls keine praktische Umsetzung statt, sodass die Anwendbarkeit nicht überprüft werden kann. [TERI22] ERLACH ET AL. entwickeln ein Rahmenwerk für die vier Phasen der digitalisierten WSM. Hierbei orientieren die Autor:innen sich an den vier Phasen des PDCA-Zyklus, um diesen unterschiedliche Werkzeuge der Digitalisierung zuzuordnen. Auf diese Weise ermöglichen sie einen geschlossenen Informationsfluss, wobei eine Umsetzung ebenjenes nicht Teil der Veröffentlichung ist und somit die praktische Wirksamkeit des Rahmenwerks nicht belegt ist. [ERLA23] Eine Übersicht der identifizierten Weiterentwicklungsansätze zur digitalisierten WSM findet sich in Abbildung 11.

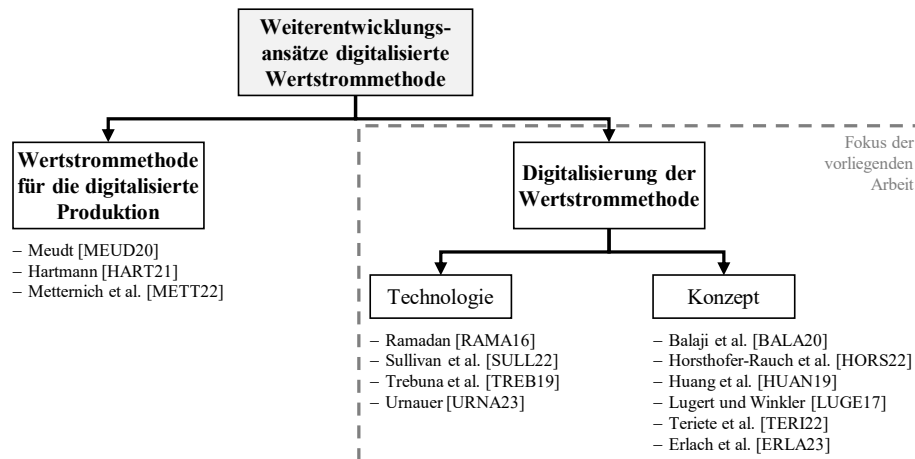


Abbildung 11: Weiterentwicklungsansätze digitalisierte Wertstrommethode (Eigene Darstellung)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die bestehenden Weiterentwicklungsansätze für die digitalisierte WSM neben konzeptionellen Ansätzen insbesondere einen hohen Technologiefokus aufweisen. Die Wirksamkeit der Umsetzungen wird an individuellen Beispielen gezeigt, eine Verallgemeinerung der Anwendungen findet jedoch nicht statt.

### 2.2.6 Zwischenfazit

Die Wertstrommethode ist ein in der industriellen Praxis regelmäßig angewandtes Vorgehen, um ein schlankes Produktionssystem zu etablieren. Die in Abschnitt 2.2.3.1 aufgezeigten Stärken zeigen, dass insbesondere durch die standardisierte Symbolik ein Wertstromabbild erzeugt werden kann, welches essenziell für das gemeinsame Verständnis der Produktion und deren Herausforderungen ist. Die in Abschnitt 2.2.3.2 aufgezeigten Schwächen legen hingegen dar, dass eine Weiterentwicklung der Methode unter den dynamischen Einflussgrößen, denen jeder Wertstrom unterliegt, unabdingbar ist. Dies kann erreicht werden, indem zwei Weiterentwicklungsrichtungen – das Wertstrommanagement und die digitalisierte Wertstrommethode – zu einem *datenbasierten Wertstrommanagement* verbunden werden (vgl. Abschnitt 2.2.4). Die in Abschnitt 2.2.5.1 vorgestellten Weiterentwicklungsansätze bzgl. der Einführung eines Wertstrommanagements zeigen, dass das Konzept des Wertstrommanagements in der Wissenschaft unterschiedlich definiert und diskutiert wird. Über eine Diskussion der Konzepte geht der wissenschaftliche Diskurs zum aktuellen Zeitpunkt jedoch kaum hinaus. Insbesondere die praktische Perspektive – „welche Aufgaben muss das Wertstrommanagement erfüllen“ – sowie die Frage nach der Unterstützung durch digitale Technologien wird bisher unzureichend adressiert. Hieraus leitet sich der erste Forschungsbedarf für die vorliegende Arbeit ab:

**Forschungsbedarf 1:** Identifikation der praxisrelevanten Aufgaben für das datenbasierte Wertstrommanagement.

Weiterhin wurden in Abschnitt 2.2.5.2 existierende Weiterentwicklungsrichtungen für die digitalisierte Wertstrommethode diskutiert. Diese weisen neben konzeptionellen

Ansätzen einen hohen Technologiefokus auf, wobei es sich um individuelle Anwendungen einzelner Industrie 4.0-Technologien handelt, ohne einen Anspruch auf Allgemeingültigkeit aufweisen zu können. Aufgrund der Vielfalt existierender Industrie 4.0-Technologien wird im Folgenden das Thema Digitalisierung in der Produktion im Allgemeinen eingeordnet sowie eine Eingrenzung im Kontext des Wertstrommanagements vorgenommen.

## 2.3 Digitalisierung in der Produktion

Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen aus dem Bereich Digitalisierung und Industrie 4.0 erläutert (Abschnitt 2.3.1). Im Anschluss wird der Zusammenhang von Digitalisierung und schlanker Produktion (Abschnitt 2.3.2) beschrieben sowie die Verknüpfung zwischen Digitalisierung und WSMM (Abschnitt 2.3.3) erarbeitet. Abschließend wird ein Zwischenfazit (Abschnitt 2.3.4) gezogen.

### 2.3.1 Grundlagen

Nachstehend werden eine Abgrenzung der Begriffe Digitalisierung und Industrie 4.0 (Abschnitt 2.3.1.1), eine Einführung der Kernelemente der Industrie 4.0 (Abschnitt 2.3.1.2) sowie bestehende Potenziale im Produktionskontext (Abschnitt 2.3.1.3) erläutert.

#### 2.3.1.1 Digitalisierung und Industrie 4.0

In der Literatur wird der Begriff *Digitalisierung* unterschiedlich interpretiert. MERTENS ET AL. ermittelten in einer Umfrage in Wirtschaft und Wissenschaft drei differenzierende Interpretationen [MERT17]:

- Digitalisierung bezeichnet die Überführung von analogen in digitale Werte.
- Digitalisierung ist Automation unter Nutzung des (informations-)technischen Fortschritts.
- Digitalisierung ist Automation erweitert um die Änderung der Geschäftsmodelle.

Der Begriff *Industrie 4.0* (I 4.0) hingegen bezeichnet zum einen die vierte industrielle Revolution der Produktion<sup>5</sup> und zum anderen das Leitbild für die Produktion von Morgen [PLAT23]. Da Industrie 4.0 eine Zukunftsvision darstellt und mehrere Bereiche umfasst, existieren unterschiedliche Definitionen des Begriffes<sup>6</sup>. Der Definition der PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 folgend, bezeichnet „Industrie 4.0 [...] die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie“ [PLAT23].

---

<sup>5</sup> Dies impliziert, dass vor dieser Revolution bereits drei weitere industrielle Revolutionen stattgefunden haben. Auf eine weitere Detaillierung wird an dieser Stelle verzichtet, da dies nicht zum Kern der Forschungsarbeit beiträgt. Für weitere Informationen siehe [KAGE13].

<sup>6</sup> Eine umfangreiche Auflistung der unterschiedlichen Definitionen findet sich in [MERT17].

Um dies in der industriellen Praxis umzusetzen können, ergeben sich zwei grundlegende Tendenzen. Zum einen wird die *Steigerung von Effizienz und Transparenz* innerhalb der Produktionsprozesse verfolgt – als Vision wird hier oftmals die sog. Smart Factory erwähnt. Zum anderen wird auf eine *Steigerung von Produkteigenschaften* – bspw. durch die Entwicklung sog. Smart Products – gesetzt [LUGE19b]. Folgende Ziele sind hierbei für Unternehmen essenziell [LICH15]:

1. Horizontale Integration: Die Wertschöpfungskette ist mit Lieferanten und Kunden sowie die Prozessschritte miteinander vernetzt.
2. Vertikale Integration: Menschen, Maschinen und Ressourcen werden digital abgebildet und kommunizieren miteinander.
3. Der Mensch ist Dirigent der Wertschöpfung.

Um diese Ziele erreichen zu können, existieren in der Wissenschaft und in der industriellen Praxis diverse Technologien und damit Kernthemen, welche die Industrie 4.0 charakterisieren.

### 2.3.1.2 Elemente der Industrie 4.0

Grundlegend wird Industrie 4.0 durch die Themenfelder *horizontale* und *vertikale Integration* entlang der Wertschöpfungskette charakterisiert [BAUE16]. Durch diese digitale Durchgängigkeit entsteht ein *cyberphysisches System*, welches durch weitere Elemente wie *Cloud Computing*, *Big Data* und *Analytik* unterstützt wird [LUGE19b, TSCH15, KELL22a]. Ermöglicht wird dies durch die Nutzung von *Auto-ID Technologien* und *Echtzeitdaten* innerhalb eines *Digitalen Zwillinges* oder einer *Simulation* [KINK20, BAUE16, PIST20]. Im Folgenden wird daher auf die in Abbildung 12 aufgeführten Kernelemente der Industrie 4.0 eingegangen.

Kernelemente der Industrie 4.0				
Horizontale Integration	Cyberphysische Systeme	Analytik	Auto-ID	2.4.1 Digitaler Zwilling
Vertikale Integration	Cloud Computing	Big Data	Echtzeitdaten	Simulation

Abbildung 12: Kernelemente der Industrie 4.0

### Horizontale und vertikale Integration

*Horizontale Integration* bezeichnet die Vernetzung von Systemen und Prozessen innerhalb einer Wertschöpfungskette, um die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen zu verbessern [KAGE13]. Ziel ist eine reibungslose Zusammenarbeit und hohe Flexibilität, was nur durch den Austausch von Daten und Informationen entlang der Wertschöpfungskette mithilfe offener und standardisierter Schnittstellen erreicht werden kann [KAUF17]. *Vertikale Integration* hingegen bezeichnet die Vernetzung von Systemen und Prozessen innerhalb eines Unternehmens [KAGE13]. Ein Daten- und Informationsaustausch findet

von Maschinen- bis zur Managementebene entlang der Automatisierungspyramide statt. Ziel ist es, eine durchgängige und transparente Produktion zu schaffen, sodass objektive Entscheidungen in Echtzeit getroffen werden können. [PIST20] Somit sind die horizontale und vertikale Integration die grundlegenden Bausteine für eine intelligente und vernetzte Produktion bzw. Wertschöpfungskette im Rahmen von Industrie 4.0.

### **Cyberphysische Systeme und Cloud Computing**

*Cyberphysische Systeme* sind als Weiterentwicklung mechatronischer Systeme zu verstehen und integrieren physische und virtuelle Komponenten, sodass eine enge Verbindung zwischen physischer und digitaler Welt entsteht [BAUE16]. Ein CPS besteht dabei aus verschiedenen Komponenten, wie Prozessen, Maschinen, Sensoren, Aktoren oder Algorithmen [PIST20, KELL22a], die zusammenarbeiten, sodass Daten in Echtzeit gesammelt, verarbeitet und analysiert werden können, um die physische Welt zu steuern und zu verbessern [LUGE19b]. Aufgrund der Integration von CPS in bestehende Produktionen steigen die Anforderungen an die verwendeten IT-Systeme kontinuierlich. An dieser Stelle ermöglicht es *Cloud Computing* Unternehmen, flexibel auf IT-Anforderungen zu reagieren und Kosten zu sparen [PIST20]. Daten müssen nicht mehr in eigenen Datenbanken gespeichert werden, sondern können in kostengünstigeren Cloud-Systemen gespeichert, verarbeitet und analysiert werden [KELL22a]. Allerdings sind darüber hinaus Herausforderungen, wie Datenschutz, die richtige Wahl des Cloud-Service-Providers und die Integration der Cloud-Lösung in die bestehende Produktionsumgebung zu beachten. [BAUE16]

### **Analytik und Big Data**

*Analytik* bezeichnet die Verarbeitung und Analyse von Daten aus verschiedenen IT-Systemen [PIST20]. Hierzu werden in der Produktion Daten aus Sensoren, Maschinen oder Traceability-Systemen erfasst, um Prozesse zu verbessern, Engpässe zu identifizieren und objektive Entscheidungen zu treffen [BAUE16]. In diesem Kontext bezeichnet *Big Data* große Datenmengen, die erfasst und verarbeitet werden [LUGE19b]. Big Data ermöglicht auf diese Weise die Analyse komplexer Prozesse, das Erkennen von Zusammenhängen sowie die datenbasierte Entscheidungsfindung. Analytik und Big Data ermöglichen gemeinsam die intelligente Produktion, bei der Prozesse kontinuierlich an die Marktanforderungen angepasst werden, sodass Unternehmen ihre Produktion effizienter gestalten können [KELL22a].

### **Auto-ID und Echtzeitdaten**

*Auto-ID (Automatische Identifikation)* bezeichnet die automatische Erfassung und Identifikation von Objekten durch Technologien wie Barcode, RFID oder NFC (Near Field Communication) [PIST20]. Auto-ID ermöglicht die Automatisierung von Produktions- und Logistikprozessen, indem Produkte automatisch identifiziert, lokalisiert und verfolgt werden [SCHN19]. Auf diese Weise ist eine echtzeitnahe Erfassung von Lagerbeständen, eine Verbesserung des Materialflusses sowie einzelner Produktionsprozesse realisierbar [METT16]. *Echtzeitdaten* in der Produktion stammen bspw. von Auto-ID Systemen,



zusätzlich installierter Sensorik oder es handelt sich um Maschinendaten, wie Temperatur-, Druck- oder Stromverbrauchsdaten. Neben der Verbesserung einzelner Produktionsprozesse kann die Verwendung von Echtzeitdaten unmittelbaren Einfluss auf die Qualität der Produkte haben, da Fehler und Abweichungen sofort erkannt und behoben werden können [SCHU18]. Sowohl Auto-ID als auch Echtzeitdaten spielen daher eine wichtige Rolle in der digitalen Transformation, da sie die Grundlage für datenbasierte Entscheidungen und Prozessverbesserungen bilden [ABEL15].

### **Digitaler Zwilling und Simulation**

Der *Digitale Zwilling* (vgl. Abschnitt 2.4.1) ist die Repräsentation eines realen Produktes, Prozesses oder Systems in der virtuellen Welt, der durch eine kontinuierliche Datenerfassung aus verschiedenen IT-Systemen mit Daten versorgt wird. Das auf diese Weise erzeugte Modell der Realität ermöglicht die Verbesserung des jeweiligen Betrachtungsgegenstandes. [NETO20] Eine *Simulation* wird im Rahmen der Prozessverbesserung verwendet, um vorab verschiedene Szenarien zu testen und zu vergleichen, sodass die beste Lösung gefunden wird [SKOO12]. So können Risiken und Kosten minimiert und die Effizienz gesteigert werden, indem Probleme bereits vor der Implementierung identifiziert und eliminiert werden können [RAMA19].

#### *2.3.1.3 Potenziale von Digitalisierung und Industrie 4.0*

Obwohl die Wissenschaft bei der Definition und den Kernthemen von Industrie 4.0 unterschiedliche Meinungen vertritt, ist sie sich einig, dass die Potenziale, die Industrie 4.0 beigemessen werden, signifikant sind. Nachstehend wird hierfür zwischen qualitativen und quantitativen Potenzialen differenziert.

### **Qualitative Potenziale**

Eine Studie des BUNDESMINISTERIUMS FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE<sup>7</sup> identifiziert, dass insbesondere auf die Effizienz von Produktionsprozessen, die Individualisierbarkeit von Gütern und Dienstleistungen positiver Einfluss genommen werden kann. Die hohe Schnelligkeit von digitalen gegenüber mechanischen Systemen ist dabei ausschlaggebend. [BUND21] Darüber hinaus bietet Industrie 4.0 neue Möglichkeiten in Bezug auf die Transparenz von Produktionsprozessen, sowie durch die Verfügbarkeit von Informationen über ebenjene die Möglichkeit zur Simulation von Prozessveränderungen, vor der Implementierung [KÖNI17]. Einer Studie von KETTELER UND KÖNIG nach sehen 87 % der Expert:innen zum einen hohes bis sehr hohes Potenzial in der Echtzeit-Produktionsüberwachung zur Verschlankeung ihrer Produktionsprozesse, zum anderen wird in einer umfangreichen Ansammlung und Verfügbarkeit von verwertbaren Daten die Basis für erhöhte Prozesstransparenz und -verbesserung gesehen [KETT17]. Laut MAURER stellen sich die unmittelbar erzielbaren Mehrwerte eines Industrie-4.0-Projektes bereits innerhalb der ersten Monate ein [MAUR17]. Neben den qualitativen Potenzialen, die der

---

<sup>7</sup> Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Studie handelte es sich noch um das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Mittlerweile wurde das Ministerium umbenannt in „Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz“.

Einführung von Industrie 4.0 zugeschrieben werden, sind in der Literatur ebenso die quantitativen Potenziale eindeutig benannt.

### Quantitative Potenziale

Nach BAUERNHANSL ET AL. sollen Bestandskosten um 30-40 %, Fertigungskosten um 10-20 %, Logistikkosten um 10-30 %, Komplexitätskosten um 60-70 %, Qualitätskosten um 10-20 % und Instandhaltungskosten um 20-30 % reduziert werden können [BAUE16]. Laut WILDEMANN sind Produktivitätssteigerungen von bis zu 55 % und eine Reduktion der Herstellkosten von bis zu 20 % sowie der Durchlaufzeiten von bis zu 75 % realisierbar [WILD20]. Dabei werden allerdings nach einer Studie von KINKEL ET AL. wesentliche Wertschöpfungspotenziale in der deutschen Industrie bisher nicht adressiert. Die Analyse legt dar, dass insbesondere durch die konsequente Nutzung von Lean-Prinzipien ein Wertschöpfungspotenzial von bis zu 95 Mrd. € erzielt werden kann, welches durch die Kombination mit Industrie 4.0-Technologien weiter gesteigert werden kann. [KINK20] Um zu verstehen, wie dieses Potenzial erzielt werden kann, wird der Zusammenhang zwischen beiden Philosophien im folgenden Abschnitt diskutiert.

### 2.3.2 Digitalisierung und schlanke Produktion

Die Frage, ob Digitalisierung und schlanke Produktion vereinbar sind oder konkurrieren, ist in der Literatur umfangreich diskutiert. Sie unterscheiden sich folgendermaßen:

- Bei **Industrie 4.0** ist die Technologie Treiber für die Realisierung von selbstoptimierenden Systemen. Sowohl Komplexität als auch Datenanalyse soll mithilfe einer vollständigen IT-Durchdringung ermöglicht werden [BAUE16].
- **Schlanke Produktion** hingegen stellt einen ganzheitlichen Ansatz dar, welcher Mensch, Technik und Organisation äquivalent berücksichtigt und im Rahmen des KVPs die systematische Komplexitätsreduktion des Produktionssystems durch den Mensch als oberstes Ziel definiert [ÖNO13, LIKE06].

Die Gemeinsamkeiten bestehen in den Zielen, die beide Ansätze verfolgen. Schlanke Produktion strebt die ganzheitliche Vermeidung von Verschwendung an, um Produktivität und Flexibilität zu maximieren, während Industrie 4.0 durch konsequente Technologie-nutzung ebenfalls eine Steigerung von Produktivität und Flexibilität verfolgt. [KASP15] Potenziale zur Weiterentwicklung der schlanken Produktion entstehen insbesondere durch eine einfachere Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung von Informationen [METT17]. Dabei wird das Zusammenspiel in der Literatur aus drei Blickwinkeln betrachtet: Zum einen wird *schlanke Produktion als notwendige Voraussetzung für Industrie 4.0* betrachtet, zum anderen besitzt *Industrie 4.0 das Potenzial die Effektivität der Methoden der schlanken Produktion zu steigern*. Darüber hinaus kann die Kombination beider Ansätze die Produktionssysteme stärken. Eine Übersicht zur Vertretung dieser Aussagen in der Literatur findet sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Digitalisierung und schlanker Produktion

Aussage	Quelle										
	[WAGN17]	[BUER18]	[MAYR18]	[LAI19]	[PERE19]	[DAVI20]	[ROSI20]	[SCHU20c]	[VALA20]	[AGOS21]	[SILV22]
Schlanke Produktion ist notwendige Voraussetzung für Industrie 4.0		●	●			●	●	●		●	
Industrie 4.0 steigert die Effektivität der schlanken Produktion		●	●	●	●		●	●		●	●
Die Kombination von schlanker Produktion und Industrie 4.0 unterstützt die effiziente Gestaltung der Produktionssysteme	●		●					●	●		●

Um eine *effiziente Gestaltung der Produktionssysteme* realisieren zu können, braucht es eine *Kombination beider Konzepte*. Aufbauen auf der schlanken Produktion können schlanke, verschwendungsfreie Prozesse gezielt durch die richtige, digitale Technologie unterstützt werden, um auf diese Weise eine schnellere Entscheidungsfindung sowie objektive Entscheidungen zu ermöglichen [METT18]. Die notwendigen Zusammenhänge der Elemente beider Konzepte sind daher in der Literatur vielfach diskutiert [MAYR18, PERE19, CIAN21, DILL22b]. Die Wirksamkeit der Kombination wird unter anderem durch die Studie von KETTELER UND KÖNIG belegt. In ebenjener wird ein Zusammenhang zwischen Lean- und Digitalisierungsreife Grad identifiziert. Unternehmen, welche die Relevanz schlanker Produktionssysteme erkannt haben und einen hohen Lean-Reife Grad aufweisen, besitzen in der Regel ebenfalls einen hohen Digitalisierungsreife Grad. [KETT17] Da in diesem Fall die Verbesserungspotenziale konventioneller Lean-Methoden weitreichend ausgenutzt sind, ist eine Fokussierung mithilfe von I 4.0-Technologien der nächste Schritt im Streben nach kontinuierlicher Verbesserung. Wie dies im Kontext der WSM gelingen kann, wird im folgenden Abschnitt erörtert.

### 2.3.3 Digitalisierung und Wertstrommanagement

Um die zielgerichtete Digitalisierung des Wertstrommanagements zu ermöglichen, ist es zunächst erforderlich, den *Datenbedarf für das Wertstrommanagement* (Abschnitt 2.3.3.1) zu bestimmen, bevor im Anschluss die *Ansätze der Industrie 4.0 zur Erzeugung des Datenbedarfs* (Abschnitt 2.3.3.2) analysiert werden.

#### 2.3.3.1 Datenbedarf für das Wertstrommanagement

Der in Abschnitt 2.2.4 identifizierte Weiterentwicklungsbedarf der Wertstrommethode zeigt, dass ein zentrales Element die einfache und schnelle Erfassung der relevanten Daten für die Erstellung des Ist-Zustandes des betrachteten Wertstroms ist. Um dies mithilfe von Industrie 4.0-Technologien zu unterstützen, werden zunächst die für das Wertstrommanagement relevanten Daten identifiziert und kategorisiert (vgl. Abbildung 13). Die Kategorisierung der Daten erfolgt auf Basis der drei Werke von ERLACH, GOTTMANN und PFEFFER, die sich mit der Verbesserung von Wertströmen auf Basis von Daten befassen [ERLA20, GOTT19, PFEF14]. Den Ausführungen folgend lassen sich die für die Ist-

Analyse eines Wertstroms benötigten Daten in die Kategorien *Lieferanten*, *Personal*, *Finanzen*, *Qualität*, *Produktion* – mit den beiden Subkategorien *Produkt* und *Prozess* – sowie *Kunden* unterteilen. Nachstehend werden die Kategorien sowie die zentralen Kennzahlen vorgestellt.

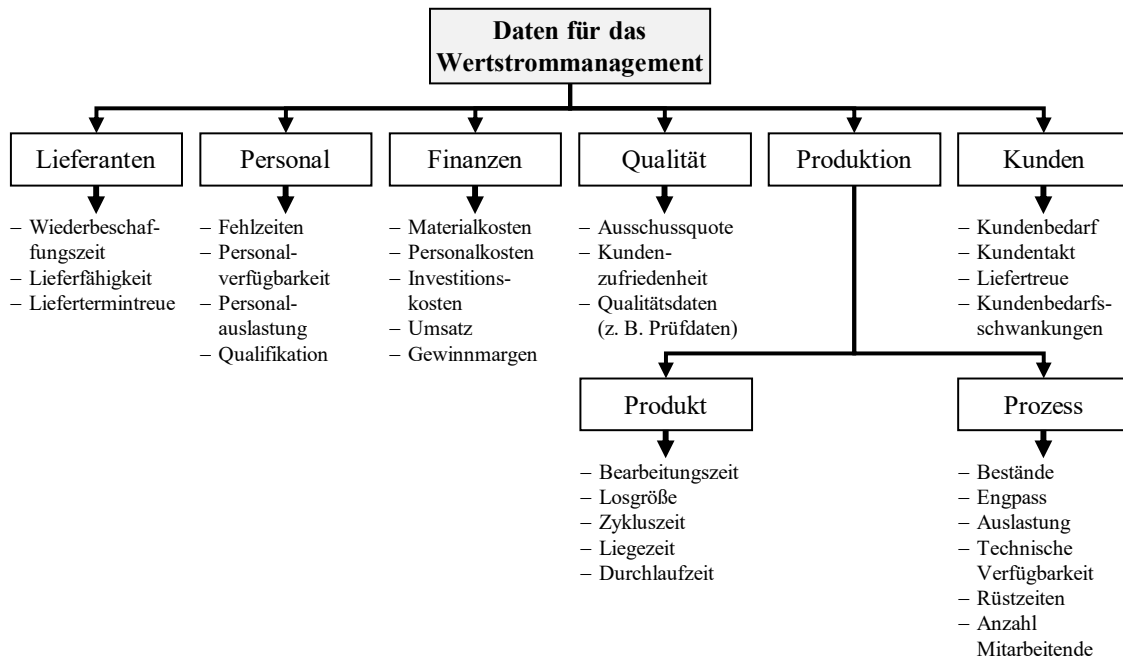


Abbildung 13: Daten für das Wertstrommanagement (Eigene Darstellung in Anlehnung an [ERLA20, GOTT19, PFEF14])

### Lieferanten

Im Bereich der Lieferanten stellt die *Wiederbeschaffungszeit* eines Prozessschrittes einen wesentlichen Indikator für die Liefereffizienz dar. Diese Zeitdauer, die benötigt wird, um Materialien an den spezifischen Prozessschritt zu liefern, beeinflusst unmittelbar die Gesamtdurchlaufzeit des Wertstroms. Eine kurze Wiederbeschaffungszeit wird daher als Indikator für eine reaktionsschnelle Lieferkette interpretiert, während lange Wiederbeschaffungszeiten auf Verbesserungspotenziale im Beschaffungsprozess hindeuten. [ERLA20] Die *Lieferfähigkeit*, als weitere zentrale Kennzahl für die Lieferanten, beschreibt die Fähigkeit, die angefragten Aufträge in Bezug auf Menge, Qualität, Preis, Material, Lieferort und -zeit erfüllen zu können. Die *Liefertermintreue* wiederum gibt Aufschluss über die Zuverlässigkeit eines Lieferanten, indem sie den Prozentsatz der Lieferungen misst, die innerhalb des vereinbarten Zeitrahmens eintreffen. Zusammenfassend bieten die drei Kennzahlen die Möglichkeit, die zeitliche Dimension der Lieferantenbeziehungen zu bewerten und stellen somit einen zentralen Aspekt für die Analyse und Verbesserung eines Wertstroms dar. [GOTT19]

### Personal

Ungeplante *Fehlzeiten* besitzen einen unmittelbaren Einfluss auf die Effizienz der Prozessabläufe. Unvorhergesehene Abwesenheiten beeinträchtigen die Kapazitätsplanung

und führen zu Unterbrechungen oder Verzögerungen im Herstellungsprozess. Das Ziel der Unternehmen ist es daher, die *Personalverfügbarkeit* zu maximieren. Dabei wird die tatsächlich für wertschöpfende Tätigkeiten zur Verfügung stehende Zeit durch Abzug von Pausen, Urlaub und nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten, wie z. B. Shopfloor-Besprechungen oder Projektarbeiten, von der Gesamtarbeitszeit ermittelt. Anknüpfend hieran wird mit der Kennzahl *Personalauslastung* gemessen, welcher Anteil der Arbeitszeit für die wertschöpfenden Tätigkeiten verwendet wird. Diese stellt somit ein Maß für die operative Effizienz dar. Insbesondere bei Engpassprozessen oder personalintensiven Prozessen stellt die Kennzahl eine zu optimierende Größe dar. [GOTT19] Eine Möglichkeit, die vorherigen Kennzahlen zu beeinflussen, stellt die *Qualifikation* der Mitarbeitenden dar. Investitionen in die Weiterbildung erhöht die Flexibilität der Mitarbeitenden, sodass diese an unterschiedlichen Prozessschritten eingesetzt werden können. Auf diese Weise wird die Anpassungsfähigkeit des Wertstrom erhöht und es kann auf ungeplante Veränderungen kurzfristig reagiert werden. [ERLA20]

### **Finanzen**

Um Kapitalbindungskosten zu minimieren, werden Bestände in Unternehmen kontinuierlich gesenkt. Diese Strategie führt zu einer Erhöhung der Bestellfrequenz mit kleineren Bestellmengen, was in der Regel zu höheren *Materialkosten* bzw. Bestellkosten führt. Strategisch ist allerdings die Minimierung dieser Kosten anzustreben, um eine erhöhte Flexibilität in der Lieferkette bei gleichzeitiger Kosteneffizienz zu erreichen. [ERLA20] Neben den Materialkosten ist insbesondere in personalintensiven Prozessen, wie Montageprozessen, die Optimierung der *Personalkosten* von entscheidender Bedeutung. Die kontinuierliche Umsetzung der fünf Prinzipien schlanker Produktionssysteme (vgl. Abschnitt 2.1) helfen bei der Steigerung der Effizienz der Prozesse und beeinflussen somit indirekt die Personalkosten. Des Weiteren sind im Sinne der langfristigen Entwicklung des Wertstroms Investitionen in moderne Anlagen oder Technologien unerlässlich. Die hierfür notwendigen *Investitionskosten* müssen kalkuliert werden und den erwarteten Einsparungen gegenübergestellt werden, sodass eine objektive Entscheidungsgrundlage für die Investition gegeben ist. Die Optimierung der genannten Kostenparameter zielt darauf ab, den *Umsatz* und die *Gewinnmargen* zu steigern, indem die operativen Kosten langfristig reduziert werden. Parallel hierzu kann der Absatz durch die Steigerung der Produktionskapazitäten und die somit absetzbare Menge erhöht werden. Dabei ist es essenziell, zu überprüfen, ob die gesteigerten Kapazitäten auf eine entsprechende Nachfrage auf Kundenseite treffen und nicht zu Überproduktion und Beständen führen. [PFEF14]

### **Qualität**

Im Bereich der Qualität sind Kennzahlen zu berücksichtigen, um die Produkt- bzw. Produktionsqualität zu gewährleisten, die den Anforderungen der Kunden entsprechen. [ERLA20]. Die *Ausschussquote* dient hierbei als zentraler Indikator für die Quantifizierung der Anzahl schlecht produzierter Teile innerhalb jedes Prozessschrittes und stellt somit ein Maß für die Stabilität der Prozesse dar. Das Ziel ist es, die Ausschussquote kontinuierlich zu reduzieren. [DIN20]. Neben der Ausschussquote ist die Kennzahl

*Kundenzufriedenheit* ein externer Indikator, inwieweit das Unternehmen in der Lage ist, die externen Qualitätsanforderungen zu erfüllen und stellt somit ein Maß für die Produktqualität dar. Hierzu zählen bspw. die Funktionsfähigkeit des Produktes oder die äußerlich sichtbaren Merkmale und Unversehrtheit [GOTT19]. Weiterhin stellt die Dokumentation produktspezifischer *Qualitätsdaten* einen zentralen Aspekt dar, um eine Rückverfolgbarkeit und Einleitung korrigierender Maßnahmen bei Qualitätsabweichungen zu ermöglichen. Die transparente Dokumentation der Qualitätsdaten ermöglicht es den Unternehmen, kurzfristig Maßnahmen zu entwickeln, um die Produkt- und Produktionsqualität sicherzustellen. [ERLA20]

### **Produkt**

Für das Wertstrommanagement stellt das Produkt den wichtigsten Kennzahlenbereich dar. Dabei ist die *Bearbeitungszeit*, die Zeitspanne, die ein Produkt oder Los an einem expliziten Prozessschritt benötigt, die grundlegende Kennzahl zur Beurteilung der Geschwindigkeit des Wertstroms. Ist die *Losgröße* am Prozessschritt größer eins, so ist diese gesondert aufzuführen, um die Kalkulation der *Zykluszeit*<sup>8</sup> zu ermöglichen. Die *Zykluszeit* ist dabei eine zentrale Kennzahl für die Taktung und Synchronisation der Produktionsabläufe. [DIN20] Des Weiteren kommt der *Liegezeit* eine signifikante Bedeutung zu. Diese zeigt auf, wie lange ein Bauteil vor oder nach einem Prozess ohne wertschöpfende Aktivitäten auf die Bearbeitung wartet. Die *Liegezeit* gibt Aufschluss über bestehende Engpässe und Überproduktionen und stellt somit einen Indikator für Ineffizienzen im Materialfluss dar. Die aggregierte Summe der Bearbeitungs- und Liegezeiten definiert die *Durchlaufzeit* des Produktes, die zentrale Kennzahl eines Wertstroms. [ERLA20] Eine Reduktion der *Durchlaufzeit* ermöglicht eine Steigerung der Reaktionsfähigkeit auf Kundennachfragen und somit eine Steigerung der Gesamtproduktivität.

### **Prozess**

Für die kontinuierliche Verbesserung des Wertstroms ist die Bewertung der Prozesse notwendig. Die hierbei verwendeten Kennzahlen sind Instrumente, die die Leistungsfähigkeit einzelner Prozesse und deren Verbindungen bewerten. Ein zentraler Bestandteil ist die Bestimmung der *Bestände*, um Engpässe und Ineffizienzen im Materialfluss identifizieren zu können. [DIN20] Der *Engpass*, der den Rhythmus des Wertstroms bestimmt, beeinflusst unmittelbar die Bestände und somit auch die *Durchlaufzeit*. Daher ist die kontinuierliche Überwachung und Verbesserung des Engpassprozesses elementar, um einen schlanken Materialfluss zu ermöglichen. Dies wird unterstützt, indem die Kapazitätsauslastung der einzelnen Prozessschritte bestimmt wird. Hierfür werden die Kennzahlen *Auslastung*, *technische Verfügbarkeit*, *Rüstzeiten* und die *Anzahl der Mitarbeitenden* an den Prozessschritten aufgenommen, sodass eine Abtaktung und Verbesserung des Materialflusses vorgenommen werden kann. [ERLA20]

---

<sup>8</sup> Die *Zykluszeit* berechnet sich, indem die *Bearbeitungszeit* eines Prozessschrittes durch die Anzahl der Parallelressourcen des jeweiligen Prozessschrittes dividiert wird.

## Kunden

Um einen Wertstrom hinsichtlich der Erfüllung der Kundenwünsche bewerten zu können, sind drei miteinander in Beziehung stehende Kennzahlen zu betrachten. Der *Kundenbedarf* für die Produktfamilie des Wertstroms bestimmt, welche Mengen des Produktes der Wertstrom in einer definierten Zeit fertigen muss [ERLA20]. In Kombination mit der in diesem Zeitraum verfügbaren Arbeitszeit berechnet sich der *Kudentakt* als Quotient aus verfügbarer Arbeitszeit und dem Kundenbedarf pro Zeithorizont [DIN20]. Der Kundentakt bestimmt hierbei den Rhythmus der Produktion, welchem jeder Prozessschritt zu folgen hat. In einer variantenreichen Produktion mit individuell schwankenden Anforderungen und nachgefragten Mengen seitens der Kunden kann durch die Ermittlung der *Kundenbedarfsschwankungen* ein Flexibilitätskorridor bestimmt werden, in dem der Wertstrom der betrachteten Produktfamilie operieren sollte. [ERLA20] Aus Sicht der Kunden stellt die *Liefertreue* ein Maß für die logistische Leistungsfähigkeit des Wertstroms, welches es zu maximieren gilt, dar. Dies ist leicht zu erreichen, sofern alle Produkte als Fertigware in den maximalen Bestellmengen der Kunden vorgehalten werden. Je nach Varianz der Endprodukte bedingt dies hohe Kapitalbindungskosten, weshalb die Reduktion der Bestände konträr zur Liefertreue zu verstehen ist. [ERLA20]

Die aufgezeigten Kennzahlen stellen die in der Literatur am häufigsten genannten Datenbedarfe für eine Verbesserung eines Wertstroms dar. Diese können allerdings für jedes individuelle Unternehmen variieren und um oben nicht aufgeführte Kennzahlen erweitert werden [URNA19]. Mit welchen technologischen Ansätzen der Industrie 4.0 dieser Datenbedarf gedeckt werden kann, zeigt der folgende Abschnitt.

### 2.3.3.2 Ansätze der Industrie 4.0 zur Deckung des Datenbedarfs

Während in Abschnitt 2.2.5.2 bestehende Weiterentwicklungsansätze vorgestellt worden sind, deren Impuls zur Weiterentwicklung auf Basis der identifizierten Schwächen der Wertstrommethode beruht, erfolgt nachstehend eine Analyse der technischen Weiterentwicklungsmöglichkeiten unter Zuhilfenahme von I 4.0-Technologien, welche in Abschnitt 2.3.1.2 detailliert worden sind.

CIANO ET AL. ermitteln mithilfe einer multiplen Anwendungsfall-Studie Eins-zu-Eins-Beziehungen zwischen I 4.0-Technologien und Methoden der schlanken Produktion. Hierbei wird die WSM dem Konzept der *vertikalen Integration* zugeordnet. Eine Verknüpfung besitzt das Potenzial, Schwachstellen in der Produktion zu identifizieren und mithilfe einer durchgängigen Datenintegration zu beheben. [CIAN21] DILLINGER ET AL. nutzen eine Delphi-Studie, um ebenfalls direkte Beziehungen zwischen Techniken der schlanken Produktion und I 4.0-Technologien aufzuzeigen. In dieser Studie werden die meisten Anknüpfungspunkte zum Einsatz digitaler Technologien in der WSM identifiziert. Die Verknüpfung der Methode mit der *vertikalen Integration*, grundlegender *Analytik*, dem Bereich *Big Data*, dem *Digitalen Zwilling*, der *horizontalen Integration*, die Unterstützung durch *Auto-ID*, die Integration in *cyberphysische Systeme*, die

Verwendung von *Echtzeitdaten*, den Einsatz von *Cloud Computing* oder der Unterstützung durch *Simulation* werden als vielversprechende Weiterentwicklungspotenziale benannt. [DILL22b] ERLACH ET AL. ermitteln mithilfe einer Literaturanalyse die aktuellen Weiterentwicklungsrichtungen der WSM im Kontext der Digitalisierung. Sie sehen die größte Entwicklungsmöglichkeit bei der Unterstützung bei der Anwendung der Methode durch *Analytik* oder die Implementierung eines *Digitalen Zwillings*. [ERLA21] LANGLOTZ UND AURICH gehen in ihrer Analyse bezüglich existierender Verbindungen zwischen I 4.0-Technologien und Methoden der schlanken Produktion auf Basis von I 4.0-Clustern vor. Dabei wird die WSM dem Cluster *automatische Zustandsüberwachung* inklusive des Konzepts des *Digitalen Zwillings* zugeordnet. [LANG21b] MAYR ET AL. identifizieren anhand eines Anwendungsfalls ebenfalls Zusammenhänge zwischen Lean-Methoden und I 4.0-Technologien. Der größte Mehrwert für die WSM wird dabei in der Erhöhung der Transparenz durch ein Echtzeitabbild mithilfe von *Echtzeitdaten* des Wertstroms gesehen. Unterstützende I 4.0-Technologien sind hierbei *Auto-ID*, der *Digitale Zwilling*, die Verwendung von *Analytik* und *Big Data*, die Integration eines *Cloud Computings* sowie die *Simulation* zukünftiger Soll-Zustände. [MAYR18] DILLINGER ET AL. ordnen zum einen mithilfe von Expert:innen-Interviews I 4.0-Technologien den Methoden der schlanken Produktion zu. Zum anderen wird der Einfluss der Kombination der Methoden mit den I 4.0-Technologien den Zieldimensionen – Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität und Mitarbeitendenbeteiligung – gegenübergestellt. Dabei werden der WSM die Technologien *Big Data*, *Digitaler Zwilling*, *Auto-ID* und *Echtzeitdaten* zugeordnet. [DILL22a]. FLORESCU UND BARABAS identifizieren mithilfe einer systematischen Literaturanalyse Korrelationen zwischen Methoden der schlanken Produktion und I 4.0-Technologien. Im Hinblick auf die WSM korrelieren die Technologien *vertikale- und horizontale Integration*, *Big Data*, *Digitaler Zwilling*, *cyberphysische Systeme* und *Simulation* mit der konventionellen WSM und können zu einer Weiterentwicklung der Methode beitragen. [FLOR22] LIU UND ZHANG greifen ebenfalls auf eine systematische Literaturanalyse zurück, um die Vorteile und aktuellen Weiterentwicklungsrichtungen der WSM zu bestimmen. Im Kontext der Industrie 4.0 werden der *Digitale Zwilling*, die Nutzung von *Echtzeitdaten* sowie die Erweiterung mithilfe von *Simulation* benannt. [LIU23] ORTEGA ET AL. führen eine Fallstudien-Analyse durch, um den Einfluss von Methoden der schlanken Produktion im Zusammenspiel mit I 4.0-Technologien auf die Unternehmensleistung zu untersuchen. Für die WSM werden die Technologien *Big Data*, *Digitaler Zwilling* und *Cloud Computing* identifiziert, ohne allerdings den Einfluss auf die Unternehmensleistung zu spezifizieren. [ORTE22] PEREIRA ET AL. nutzen eine systematische Literaturanalyse, um den Einfluss von Lean-Methoden unter Zuhilfenahme von I 4.0-Technologien auf Unternehmen zu bestimmen. Dabei wird die Verwendung von *Analytik* und *Big Data* sowie die *Simulation* im Kontext der Wertstrommethode genannt. [PERE19] Die identische Vorgehensweise verfolgen ROJAS UND HUAMANCHAHA, um Tendenzen in der Kombination von I 4.0-Technologien und klassischen Lean Methoden zu ermitteln. Hierbei werden für die Erweiterung der WSM die Konzepte *Big Data*, *Digitaler Zwilling*,



*Auto-ID*, *Cyberphysische Systeme* und *Simulation* aufgeführt. Tabelle 5 bietet eine Übersicht über die identifizierten Zusammenhänge.

Tabelle 5: Zusammenhang der Wertstrommethode mit Industrie 4.0-Technologien

Quelle	Industrie 4.0-Technologien									
	Vertikale Integration	Analytik	Big Data	Digitaler Zwilling	Horizontale Integration	Auto-ID	Cyberphysische Systeme	Echtzeitdaten	Cloud Computing	Simulation
[CIAN21]	•									
[DILL22b]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
[ERLA21]		•		•						
[LANG21b]				•						
[MAYR18]		•	•	•		•		•	•	•
[DILL22a]			•	•		•		•		
[FLOR22]	•		•	•	•		•			•
[LIU23]				•				•		•
[ORTE22]			•	•					•	
[PERE19]		•	•							•
[ROJA22]			•	•		•	•			•
$\Sigma$ Nennungen	3	4	7	9	2	4	3	4	3	5

Die Analyse der I 4.0-Technologien, zusammengefasst in Tabelle 5, zeigt, dass dem Konzept des *Digitalen Zwillings* das größte Potenzial zur Adressierung der Schwächen der Wertstrommethode zugewiesen wird. Die vorliegende Forschungsarbeit konzentriert sich daher im Folgenden auf die Integration des Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement, um die dynamische Anpassung und Weiterentwicklung der Wertstrommethode zu einem datenbasierten Management-Ansatz zu unterstützen.

#### 2.3.4 Zwischenfazit

Die Ausführungen zeigen, dass das Konzept Industrie 4.0 dabei hilft, die Effizienz und Transparenz in der Produktion zu steigern (vgl. Abschnitt 2.3.1.1). Die Kernelemente der Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 2.3.1.2) können dabei unterstützen, die in der Produktion existierenden Potenziale (vgl. Abschnitt 2.3.1.3) zu adressieren. Hierbei kann die gezielte Verknüpfung von Methoden der schlanken Produktion mit spezifischen I 4.0-Technologien dazu dienen, die etablierten Methoden weiterzuentwickeln (vgl. Abschnitt 2.3.2). Die Analyse der Verknüpfung beider Themen zeigt, dass in der Literatur unterschiedliche Konzepte bestehen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Dabei wird deutlich, dass für die Verknüpfung des Wertstrommanagements mit I 4.0-Technologien bereits Ansätze existieren, um die Wertstrommethode mithilfe der Digitalisierung zu einem digitalisierten Management-Ansatz weiterzuentwickeln. Das Konzept des Digitalen Zwillings erweist sich hierbei als der vielversprechendste Ansatz. Mithilfe des virtuellen Abbildes eines realen Wertstroms

soll es in Zukunft möglich sein, dynamisch auf unvorhergesehene Ereignisse in der Produktion reagieren zu können. Da zum jetzigen Zeitpunkt nicht definiert ist, wie die Verknüpfung zwischen der Wertstrommethode und dem Digitalen Zwilling in der Praxis umgesetzt werden kann, leitet sich hieraus der zweite Forschungsbedarf der vorliegenden Arbeit ab:

**Forschungsbedarf 2:** Verknüpfung der Wertstrommethode mit dem Konzept des Digitalen Zwillings.

Aufgrund der Erkenntnisse dieses Abschnittes wird im folgenden Abschnitt das Konzept des Digitalen Zwillings und dessen Grundlagen erläutert.

## 2.4 Digitaler Zwilling

Zur Weiterentwicklung der WSM zu einem datenbasierten Management-Ansatz mittels des Digitalen Zwillings wird zunächst das Konzept des Digitalen Zwillings dargelegt und die Stärken und Herausforderungen im Anwendungskontext erarbeitet (Abschnitt 2.4.1). In der Folge wird eine Definition des Digitalen Zwillings im Wertstrommanagement präsentiert (Abschnitt 2.4.2). Im Anschluss werden existierende Ansätze, welche die Integration des Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement ermöglichen, auf ihre Eignung analysiert (Abschnitt 2.4.3). Die gewonnenen Erkenntnisse werden in einem abschließenden Fazit zusammengefasst (Abschnitt 2.4.4).

### 2.4.1 Konzept des Digitalen Zwillings

Im folgenden Abschnitt wird zunächst auf das allgemeine Konzept und die Definition des Digitalen Zwillings eingegangen (Abschnitt 2.4.1.1), bevor die Stärken und Herausforderungen in der industriellen Praxis erläutert werden (Abschnitt 2.4.1.2).

#### 2.4.1.1 Konzept und Definition

Der Begriff *Digitaler Zwilling* ist in der Literatur nicht eindeutig definiert [NEGR17, STAR19], daher werden nachstehend existierende Definitionen und Konzepte des Digitalen Zwillings erläutert und das der Arbeit zugrundeliegende Verständnis definiert.

Das Konzept des Digitalen Zwillings wurde ursprünglich von GRIEVES eingeführt und als aus drei Teilen bestehend beschrieben (vgl. Abbildung 14) [GRIE14]. Hiernach existieren in einem *realen Raum* unterschiedliche physische Produkte. Diese werden im *virtuellen Raum* durch virtuelle Produkte repräsentiert, wobei *ein bidirektionaler Daten- bzw. Informationsfluss* zwischen beiden Räumen existiert [ASSA19].

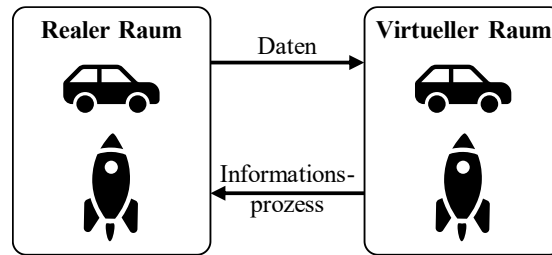


Abbildung 14: Konzept des Digitalen Zwillings (Quelle: [GRIE14])

Dieser Definition folgend erweitern KRITZINGER ET AL. die Definition, je nach Ausgestaltung des bidirektionalen Daten- und Informationsflusses, um die Konzepte des *Digitalen Modells* oder des *Digitalen Schattens*. Das Digitale Modell ist die digitale Repräsentation eines physischen Objektes, bei dem kein automatisierter Datenfluss zwischen dem realen und dem virtuellen Raum stattfindet. Der Digitale Schatten besitzt basierend auf dem Digitalen Modell einen unidirektional automatisierten Datenfluss, vom realen zum virtuellen Raum. D. h. eine Zustandsänderung in der realen Welt spiegelt sich in der virtuellen Welt wider, jedoch nicht umgekehrt. Der Digitale Zwilling wiederum baut auf dem Digitalen Schatten auf, indem der Datenfluss bidirektional automatisiert wird. [KRIT18] NEGRI ET AL. analysieren existierende Definitionen des Digitalen Zwillings im Kontext von Industrie 4.0 [NEGR17]. Hierbei stützen sie sich auf die Ausführungen von GARETTI ET AL. [GARE12] und definieren den Digitalen Zwilling als „aus einer virtuellen Repräsentation eines Produktionssystems [bestehend], die auf verschiedenen Simulationsdisziplinen laufen kann, die sich durch Synchronisation zwischen dem virtuellen und dem realen System auszeichnen, dank erfasster Daten, verbundener intelligenter Geräte, mathematischer Modelle und Echtzeit-Datenverarbeitung“. Digitale Zwillinge sind somit virtuelle Gegenstücke zu physischen Systemen und basieren dabei auf semantischen Datenmodellen, welche die Eigenschaften des physischen Systems hinreichend beschreiben [NEGR17]. BOSCHERT ET AL. definieren den Digitalen Zwilling als „die Beschreibung einer Komponente, eines Produktes, eines Systems oder eines Prozesses durch einen Satz von gut abgestimmten, beschreibenden und ausführbaren Modellen. [...] Der Digitale Zwilling entwickelt sich mit dem realen System entlang des gesamten Lebenszyklus und integriert die aktuell verfügbaren und allgemein benötigten Daten und das Wissen“ [BOSC18]. Die Definition lässt erkennen, dass sich die Datenbasis des Digitalen Zwillings über den Produktlebenszyklus kontinuierlich durch die Synchronisation von realer und virtueller Welt erweitert und somit die Verknüpfung der einzelnen Phasen ermöglicht. STARK UND DAMERAU wiederum definieren den Digitalen Zwilling als „eine digitale Repräsentation eines aktiven einzigartigen Produktes [...] oder eines einzigartigen Produkt-Service-Systems, das seine ausgewählten Merkmale, Eigenschaften, Zustände und Verhaltensweisen mithilfe von Modellen Informationen und Daten [...] abbildet“ [STAR19]. Aufgrund der diversen Anwendungsmöglichkeiten bestimmen die Autor:innen eine Vielzahl an Anwendungsfeldern und somit auch Ausprägungen von Digitalen Zwillingen, welche in einem Planungsmodell für Digitale Zwillinge zusammengefasst sind (vgl. Abbildung 15).

	1. Tiefe der Integration	2. Art der Konnektivität	3. Frequenz der Aktualisierung	4. CPS Intelligenz	5. Simulationsfähigkeit	6. Digitale Modelle	7. Menschliche Interaktion	8. Produktlebenszyklus
Ebene 0	Produkt / Maschine	Unidirektional	Wöchentlich	Von Menschen ausgelöst	Statisch	Geometrisch, kinematisch	Smart Devices	Zu Beginn (BoL)
Ebene 1	Produktionssystem	Bidirektional	Täglich	Automatisiert	Dynamisch	Verhaltenskontrolle	VR / AR	In der Mitte (MoL)
Ebene 2	Produktionshalle	Automatisch	Stündlich	Teilweise autonom	Ad-hoc	Multiphysikalisches Verhalten	Smart hybrid (intelligente Multisensor-kopplung)	Am Ende (EoL)
Ebene 3	Unternehmensübergreifend		Unmittelbar / in Echtzeit	autonom	Vorausschauend			
Anwendungsumgebung des Digitalen Zwillings				Verhalten und Fähigkeitsvielfalt des Digitalen Zwillings				DZ im Produktlebenszyklus

Abbildung 15: Dimensionen-Modell des Digitalen Zwillings (Quelle: [STAR19])

Die Dimensionen 1-3 beziehen sich auf die Anwendungsumgebung des Digitalen Zwillings, während die Dimensionen 4-7 das Verhalten und die Fähigkeitsvielfalt beschreiben. Die achte Dimension ordnet den Digitalen Zwilling den Phasen des Produktlebenszyklus zu. Dabei ist das Modell nicht als Reifegradmodell zu verstehen, sondern dient lediglich der Spezifikation und nicht der Bewertung eines Digitalen Zwillings. [STAR19]

Aufgrund der verschiedenen Perspektiven und Schwerpunkte existiert in der Literatur keine einheitliche Definition des Begriffs des Digitalen Zwillings, was die Vereinheitlichung des Konzepts erschwert.<sup>9</sup> Dennoch lassen sich einheitliche Komponenten identifizieren, welche die *Kernelemente des Digitalen Zwillings* darstellen:

1. Der Betrachtungsgegenstand ist ein *physisches Objekt* im realen Raum,
2. dieses wird repräsentiert durch ein *virtuelles Objekt* im virtuellen Raum.
3. Beide Objekte sind durch einen *bidirektionalen Daten- und Informationsfluss* unmittelbar miteinander verbunden [KRIT18].

Um eine einheitliche Definition des Digitalen Zwillings im Kontext des Wertstrommanagements zu ermöglichen, werden im Folgenden die Stärken und Herausforderungen des Digitalen Zwillings in der industriellen Praxis diskutiert, bevor eine für die vorliegende Forschungsarbeit gültige Definition präsentiert wird.

#### 2.4.1.2 Stärken und Herausforderungen des Digitalen Zwillings

Die in Tabelle 6 aufgeführten Stärken des Digitalen Zwillings legen dessen Eignung für die Weiterentwicklung der Wertstrommethode zu einem datenbasierten Management-Ansatz dar, indem sie gezielt deren Limitationen adressieren (vgl. Abschnitt 2.2.3.2).

Einer der größten Vorteile ist die *Reduktion von Zeit, Kosten und Komplexität* durch den gezielten Einsatz des Digitalen Zwillings. Durch die Erstellung des virtuellen Objektes können Fehler und Schwachstellen frühzeitig erkannt und behoben werden, bevor diese

<sup>9</sup> Eine Analyse existierender Definitionen in der Literatur findet sich bspw. in [NEGR17, STAR19, CIMI19, SJAR20].

in der Realität zu Mehraufwänden führen. [PIRE19, WAGN19, BORD20, JONE20, SCHU21, MICH22]

Tabelle 6: Stärken des Digitalen Zwillings

Nr.	Stärken des Digitalen Zwillings	Quellen
1	Reduktion von Zeit, Kosten und Komplexität	[PIRE19, WAGN19, BORD20, JONE20, SCHU21, MICH22]
2	Unterstützung des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses	[BORD20, JONE20, MELE20, RASH20, SHAO20, PERN22, SCHU21, SEME21]
3	Nutzung von Echtzeitdaten	[PIRE19, BORD20, FULL20, RASH20, PERN22, SEME21]
4	Integration von Daten aus dem gesamten Produktlebenszyklus	[HE18, WAGN19, JONE20, RASH20, SHAO20, SEME21]
5	Bewertung von Entscheidungsalternativen	[PIRE19, BORD20, JONE20, MELE20, RASH20, PERN22]
6	Erzeugung von Transparenz	[BORD20, JONE20, MELE20, RASH20, PERN22]

Darüber hinaus ist aufgrund der kontinuierlichen Aktualisierung des Digitalen Zwillings die *Unterstützung des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses* möglich, da Verbesserungen zeitnah identifiziert und umgesetzt werden können [BORD20, JONE20, MELE20, RASH20, SHAO20, PERN22, SCHU21, SEME21]. Die *Nutzung von Echtzeitdaten* ermöglicht, dass die Wirkung der Verbesserungen sofort im realen Raum verfolgt werden können [PIRE19, BORD20, FULL20, RASH20, PERN22, SEME21]. Ein weiterer Vorteil stellt die *Integration von Daten aus dem gesamten Produktlebenszyklus* dar. Dies bedeutet, dass Daten von der Konzeption bis zur Nutzung des Produktes zusammengeführt werden und dadurch Rückschlüsse für die Effizienz von Produktionsprozessen gezogen werden können [PIRE19, BORD20, JONE20, MELE20, RASH20, PERN22]. Durch die Erstellung verschiedener Szenarien unterstützt der Digitale Zwilling die *Bewertung von Entscheidungsalternativen*, sodass die bestmögliche Entscheidung getroffen und Verschwendungen minimiert werden [PIRE19, BORD20, JONE20, MELE20, RASH20, PERN22]. Zusammenfassend ist der größte Vorteil des Digitalen Zwillings die *Erzeugung von Transparenz*. Mithilfe des virtuellen Objektes erhalten die betroffenen Abteilungen und Stakeholder einen eindeutigen Überblick über das reale Objekt, wodurch die Kommunikation und Zusammenarbeit erleichtert wird [BORD20, JONE20, MELE20, RASH20, PERN22].

Ogleich das Konzept des Digitalen Zwillings eine Vielzahl an Stärken aufweist, gilt es, auch potenzielle Herausforderungen in der praktischen Umsetzung zu berücksichtigen, die im Folgenden erörtert werden. Tabelle 7 fasst die diskutierten Herausforderungen des Digitalen Zwillings, die bei der praktischen Umsetzung entstehen, zusammen.

Eine der größten Herausforderungen ist der *umfangreiche Aufbau einer IT-Infrastruktur*, die für die Implementierung erforderlich ist. Dabei muss die Skalierbarkeit sichergestellt werden, sodass eine nachträgliche Erweiterung problemlos möglich ist. [HE18, SCHL19, FULL20, JONE20, RASH20, KRUG21, MATH20, MICH22]

Tabelle 7: Herausforderungen des Digitalen Zwillings

Nr.	Herausforderungen des Digitalen Zwillings	Quellen
1	Umfangreicher Aufbau einer IT-Infrastruktur notwendig	[HE18, SCHL19, FULL20, JONE20, RASH20, KRUG21, MATH20, MICH22]
2	Fehlende standardisierte Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung	[DURÄ18, HE18, PARK19, RATH21]
3	Informationsfluss vom virtuellen in physischen Raum nicht definiert	[DURÄ18, SCHL19, MELE20, RASH20, KRUG21]
4	Standardisierung der horizontalen und vertikalen Integration notwendig	[WAGN19, MELE20, VAN 21, PERN22, RATH21, MICH22]
5	Vertrauensprobleme bei Mitarbeitenden	[PARK19, FULL20, KRUG21, MATH20, SEME21, MICH22]
6	Organisatorische Integration im Unternehmen nicht definiert	[PIRE19, SCHL19, JONE20, VAN 21, MATH20, RATH21, PERN22]

In diesem Kontext ist eine weitere Herausforderung die *fehlende standardisierte Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung*. Daten werden in unterschiedlichen IT-Systemen und Datenformaten gespeichert, sodass Kompatibilitätsprobleme bei der Datenverarbeitung auftreten. [DURÄ18, HE18, PARK19, RATH21] Ist die Datenverarbeitung erfolgt, ist sicherzustellen, dass die durch den Digitalen Zwilling erzeugten Informationen in der Realität genutzt werden können. Häufig jedoch ist der *Informationsfluss vom virtuellen in den physischen Raum nicht definiert*, sodass es zu Verzögerungen in der Informationsnutzung kommt. [DURÄ18, SCHL19, MELE20, RASH20, KRUG21] Schlussendlich ist eine *Standardisierung der horizontalen und vertikalen Integration notwendig*, um eine nahtlose Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung zu gewährleisten [WAGN19, MELE20, VAN 21, PERN22, RATH21, MICH22]. Neben den technischen Herausforderungen gibt es weitere den Einsatz des Digitalen Zwillings betreffende Herausforderungen. Häufig existieren *Vertrauensprobleme bei Mitarbeitenden*, die in der Befürchtung begründet sind, dass der Digitale Zwilling ihre Arbeit ersetzen wird. Daher ist es wichtig, die Mitarbeitenden in den Implementierungsprozess aktiv einzubinden, sodass sie verstehen, wie der Digitale Zwilling sie bei ihrer Arbeit unterstützt. [PARK19, FULL20, KRUG21, MATH20, SEME21, MICH22] Zusätzlich ist oftmals die *organisatorische Integration im Unternehmen nicht definiert*. Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten sind nicht zugewiesen und die Nutzung innerhalb bestehender Geschäftsprozesse ist nicht definiert. [PIRE19, SCHL19, JONE20, VAN 21, MATH20, RATH21, PERN22] Zusammengefasst lässt sich erkennen, dass die Herausforderungen insbesondere in der *technischen Umsetzung und Integration in bestehende Systeme* zu finden sind. Um dies zu erleichtern, werden, in Anlehnung an die Methoden der schlanken Produktion, standardisierte Modelle und Methoden benötigt, um die Herausforderungen zu adressieren. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird im Folgenden eine Definition für den Digitalen Zwilling im Anwendungskontext des Wertstrommanagements präsentiert.

## 2.4.2 Digitaler Zwilling im Wertstrommanagement

Für das Wertstrommanagement lassen sich die drei Kernelemente des Digitalen Zwillings (vgl. Abschnitt 2.4.1.1) wie folgt für den Anwendungsfall definieren:

1. *Physisches Objekt* im realen Raum: Hier bezieht sich das physische Objekt auf einen expliziten Wertstrom in einer Produktionsumgebung. Dies integriert alle physischen Komponenten des Wertstroms, von Rohmaterialien über die einzelnen Fertigungsprozesse bis hin zum fertigen Produkt. [ERLA20]
2. *Virtuelles Objekt* im virtuellen Raum: Das virtuelle Objekt im Wertstrommanagement stellt die digitale Repräsentation des gesamten Wertstroms dar. Dieses virtuelle Abbild modelliert alle Prozesse, Materialflüsse und beteiligten Ressourcen in einer virtuellen Umgebung, sodass eine umfassende und dynamische Sicht auf die Fertigungsprozesse und deren Veränderungen ermöglicht wird. [LUGE19b]
3. *Bidirektionaler Daten- und Informationsfluss*: Während ein kontinuierlicher Datenfluss vom physischen Wertstrom in das virtuelle Abbild erfolgt, sodass eine regelmäßige Aktualisierung des virtuellen Abbildes sichergestellt wird, erfolgt der Informationsfluss von der virtuellen in die physische Welt indirekt. Es werden die aktuellen Leistungsdaten des Wertstroms, welche aus der Analyse des Digitalen Zwillings stammen, bereitgestellt. Auf Basis dieser Daten werden von den Wertstrommanager:innen Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet. Um anschließend die physischen Prozesse zu verbessern, ist ein manueller Eingriff im Wertstrom unabdingbar. Eine automatische Anpassung ist in diesem Zusammenhang nicht möglich, da eine physische Verbesserung das Fachwissen der Prozessexpert:innen erfordert und durch sie selbst durchgeführt werden muss. [FRIC22a]

Der Digitale Zwilling im Wertstrommanagement dient somit als analytisches Werkzeug, das durch die datenbasierte Analyse der Dynamik des Wertstroms Handlungsempfehlungen zur kontinuierlichen Verbesserung des Wertstroms bereitstellt. Hieraus lässt sich die folgende Definition des Digitalen Zwillings im Wertstrommanagement ableiten:

**Definition Digitaler Zwilling im Wertstrommanagement:**

Der Digitale Zwilling im Wertstrommanagement, auch *Digitaler Wertstromzwilling* genannt, wird als eine umfassende digitale Darstellung eines individuellen Wertstroms verstanden. Er bildet die Eigenschaften, Abhängigkeiten und dynamischen Veränderungen des Wertstroms durch Modelle und Daten ab, mit dem Ziel, die Leistung des Wertstroms zu verbessern. Im Wertstrommanagement wird der Digitale Wertstromzwilling zur Modellierung und Darstellung einer ganzheitlichen Sicht auf die Zusammenhänge und Wechselwirkungen der Produktionsprozesse eingesetzt. Der Fokus liegt dabei auf der Verbesserung des gesamten Wertstroms, anstatt sich auf die Verbesserung individueller Fertigungsprozesse zu konzentrieren. Somit ermöglicht er die unmittelbare virtuelle Abbildung der Ergebnisse von Verbesserungsaktivitäten in der physischen Welt und erlaubt eine kontinuierliche Überprüfung und erneute Verbesserung im Sinne des PDCA-Zyklus.

Basierend auf den Kernelementen des Digitalen Zwillings und der Definition im Kontext des Wertstrommanagements werden im Folgenden bestehende Ansätze analysiert, welche die beiden Domänen *Digitaler Zwilling* und *Wertstrom* integrieren.

### 2.4.3 Integrative Ansätze

Die Ansätze können hierzu in die zwei Kategorien *Konzept* und *Methode* unterteilt werden, wobei die Kategorie *Konzept* weiterhin in *technische* und *organisatorische Konzepte* unterteilt werden kann (vgl. Abbildung 16).

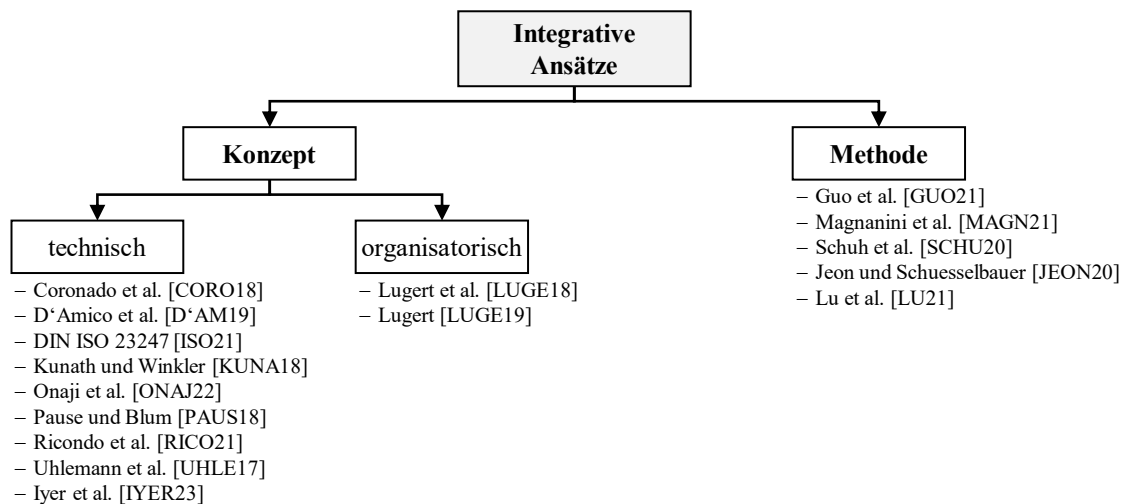


Abbildung 16: Integrative Ansätze

#### 2.4.3.1 Konzeptionelle Ansätze

Im Folgenden werden sowohl die technischen als auch die organisatorischen Konzepte vorgestellt, welche sich mit der Integration des Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement befassen.

#### Technische Ansätze

Insgesamt konnten neun wissenschaftliche Beiträge identifiziert werden, welche technische Konzepte vorstellen, wie die Umsetzung eines Digitalen Zwillings für einen Wertstrom realisiert werden kann.

CORONADO ET AL. präsentieren ein Konzept für die Implementierung eines Digitalen Zwillings für einen Shopfloor. Ihr Schwerpunkt liegt auf einer durchgängigen Datenerfassung, die sowohl den Zugriff auf die in ERP-Systemen und MES gespeicherten Daten als auch die Entwicklung einer Applikation für die Mitarbeitenden umfasst. Die Anwendbarkeit wird anschließend in einer Pilotfabrik demonstriert, ein methodischer Rahmen für die praktische Umsetzung fehlt jedoch. [CORO18] D'AMICO ET AL. verfolgen das Ziel, den aktuellen Ist-Zustand einer Produktion mithilfe eines Digitalen Zwillings zu erfassen und potenzielle Verschlechterungen durch datengetriebene Anwendungen vorherzusagen, um im Rahmen der Entscheidungsfindung zu unterstützen. Zu diesem Zweck wird



ein Modell für den Digitalen Zwilling, bestehend aus einem zentralen Modell und daran anknüpfenden Submodellen, entwickelt. Eine Erprobung des Konzepts in der Praxis findet jedoch nicht statt. [D'AM19] Auch bei KUNATH UND WINKLER steht die Entscheidungsfindung im Fokus. Die Autor:innen entwickeln ein datenorientiertes Konzept, um ein Produktionssystem mit dessen Digitalem Zwilling zu verbinden, wobei dieser aus verschiedenen Submodellen aufgebaut ist. Im Verlauf der Ausarbeitung erkennen sie jedoch, dass die Umsetzung eines Digitalen Zwillings für ein Produktionssystem zu umfangreich ist und es zielführender ist, sich auf spezifische Prozesse zu konzentrieren. [KUNA18] ONAJI ET AL. führen eine Literaturanalyse zu Digitalen Zwillingen in der Produktion durch und entwickeln auf Basis der identifizierten Literatur ein Rahmenwerk für den Digitalen Zwilling eines Produktionssystems. Im Gegensatz zu KUNATH UND WINKLER [KUNA18], demonstrieren die Autor:innen die Anwendbarkeit des entwickelten Rahmenwerks anhand von drei Fallstudien. Wie jedoch die technische Umsetzung ebenjenes in der Praxis durchgeführt wurde, wird nicht erläutert. [ONAJ22] PAUSE UND BLUM widmen sich der technischen Ausgestaltung einer Datenstruktur für den Digitalen Schatten im Rahmen der Wiederbeschaffung von Produkten. Hierbei wird sowohl die notwendige Infrastruktur in der physischen Ebene detailliert als auch auf die Datenstruktur in der virtuellen Ebene eingegangen. Allerdings fehlt auch in diesem Fall eine Anwendung des Konzeptes und die Bestätigung der Praxistauglichkeit. [PAUS18] RICONDO ET AL. konzipieren ein Modell für die Simulation und Optimierung eines Produktionssystems unter Verwendung eines Digitalen Zwillings. Das Modell basiert auf dem Digitalen Schatten als Medium zur Datenspeicherung und -verarbeitung, während der Digitale Zwilling selbst die Anwendungsfunktionen bereitstellt. Das Konzept wird in einer Achsenproduktion für Schienenfahrzeuge erprobt, wobei die grundlegende Funktionsweise bestätigt wird. Ein methodisches Vorgehen, wie bspw. die relevanten Datenpunkte für die Optimierung identifiziert werden, wird nicht bereitgestellt. Somit bleibt unklar, wie die technische Umsetzung des Modells durch die Autor:innen erfolgte. [RICO21] UHLEMANN ET AL. entwickeln einen Ansatz zur multimodalen Datenaufnahme für die Implementierung eines Digitalen Zwillings zur Verknüpfung einzelner Produktionsprozesse. Die Datenerfassung erfolgt in der physischen Ebene, gefolgt von einer Datenverarbeitung in der Datenebene und einer Analyse in der Informations- bzw. Optimierungsebene. Abschließend wird ein Verbesserungsvorschlag zurück in die Produktion gesendet. Aufgrund der fehlenden Anwendung und unzureichenden Detaillierung kann dem Konzept keine Allgemeingültigkeit zugesprochen werden. [UHLE17b] IYER ET AL. präsentieren in ihrer Arbeit ein System, um mittels eines sensorbasierten Ansatzes Daten in der physischen Ebene zu sammeln und in einer IoT-Plattform zu speichern. Mithilfe eines Simulationsmodells und einer visuellen Oberfläche werden Rückschlüsse auf die Performance gezogen. Eine praktische Erprobung in einer Lernumgebung zeigt die Anwendbarkeit des Konzeptes. Leitlinien zur Umsetzung fehlen hingegen, sodass die Reproduzierbarkeit nicht sichergestellt ist. [IYER23] Um die fehlende Anwendbarkeit bestehender Konzepte zu adressieren, hat die INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION (ISO) die Norm ISO 23247-1 entwickelt. Diese Norm bietet ein umfassendes Rahmenwerk für die technische

Gestaltung eines Digitalen Zwillings in der Produktion. Es ist jedoch zu beachten, dass lediglich einzelne Produktionsprozesse und nicht die Vernetzung entlang eines Wertstroms betrachtet werden. Darüber hinaus fehlt ein methodischer Ansatz zur praktischen Umsetzung. Die Norm kann daher lediglich als Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung dienen. [ISO21]

Die vorgestellten Konzepte beschränken sich auf theoretische Rahmenwerke oder Modelle ohne ausreichende praktische Erprobung oder spezifische Implementierungsleitlinien. Dadurch wird die Reproduzierbarkeit und Generalisierbarkeit in realen Produktionsumgebungen limitiert. Die ISO-Norm 23247-1 bietet zwar ein umfassendes Rahmenwerk, jedoch fehlt auch hier die notwendige Konkretisierung für die Vernetzung entlang eines Wertstroms und eine methodische Praxisanleitung.

### **Organisatorische Ansätze**

Neben technischen Konzepten wurden in der Literatur zwei Beiträge gefunden, die sich mit der organisatorischen Integration eines Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement befassen.

LUGERT ET AL. präsentieren ein Konzept für ein dynamisches Wertstrommanagement. Das Konzept legt den Fokus auf die Datenbereitstellung durch verschiedene IT-Systeme wie ERP-Systeme oder MES. Die Analyse und Verbesserung des Wertstroms werden mithilfe von Analytik, Simulation und Visualisierung des aktuellen Ist-Zustands erreicht. Die gewonnenen Erkenntnisse werden visualisiert, um Entscheidungen bzgl. der Verbesserung des Wertstroms zu unterstützen. Wie das Konzept in der Praxis technisch umgesetzt und implementiert werden kann wird jedoch nicht erläutert. [LUGE18] Das Konzept wird von LUGERT im Rahmen seiner Dissertation weiterentwickelt, wobei die Funktionsweise der einzelnen Elemente detailliert erläutert wird. Dabei steht die Integration des Konzeptes in bestehende Organisationsstrukturen im Mittelpunkt. In diesem Zusammenhang wird die Einführung eines Wertstrom-Shopfloor-Managements gefordert. Eine Validierung des Konzepts erfolgt anhand einer Simulationsstudie. Eine Unterstützung zur Implementierung und technischen Umsetzung in der industriellen Praxis wird jedoch nicht gegeben. [LUGE19b]

Auch die untersuchten organisatorischen Ansätze weisen Defizite in Bezug auf ihre praktische Umsetzbarkeit auf. Ähnlich wie bei technischen Konzepten fehlen klare Leitlinien und ausreichende Detaillierung, sodass die Übertragung der Ansätze in die betriebliche Praxis erschwert wird. Obwohl die Konzepte eine Analyse und Verbesserung des Wertstroms durch eine IT-Unterstützung anstreben, bleibt die technische und organisatorische Realisierung weitgehend unbeschrieben. Dies schränkt die Anwendbarkeit und Effektivität der vorgeschlagenen Lösungen in realen Produktionsumgebungen ein.

### 2.4.3.2 *Methodische Ansätze*

Neben den konzeptuellen Ansätzen existieren in der Literatur fünf Ansätze, welche ein methodisches Vorgehen zur Integration des Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement behandeln. Diese werden im Folgenden beschrieben.

GUO ET AL. entwickeln eine Optimierungsmethode, die auf dem Digitalen Zwilling einer flexiblen Montagelinie mit verketteten Prozessschritten basiert. Die Methode baut dabei auf der im Abschnitt 2.4.3.1 vorgestellten ISO 23247-1 auf und hat eine multikriterielle Optimierung in den Dimensionen Zeit, Kosten und Qualität zum Ziel. Dabei wird insbesondere die methodische Entwicklung des multikriteriellen Entscheidungsmodells detailliert beschrieben. Wie die Datenintegration aus der physischen Ebene in das Modell funktioniert, wird hingegen nicht erläutert. [GUO21] MAGNANINI ET AL. integrieren den Digitalen Zwilling in ihren methodischen Ansatz zur kurzfristigen Produktionsplanung in der variantenreichen Fertigung. Auch diesem Ansatz liegt ein multikriterielles Optimierungsproblem zugrunde, das die Ausgangslage für die Optimierung der Produktionsplanung bildet. Der Digitale Zwilling wird in diesem Kontext zur Bereitstellung und Berechnung der Kennzahlen verwendet, wie die Methode und die technische Umsetzung des Digitalen Zwillings zusammenhängen wird allerdings nicht erläutert. [MAGN21] SCHUH ET AL. stellen ein fünfstufiges Vorgehen zur Implementierung eines Digitalen Produktionszwillings in einer Klein- und Einzelerienfertigung vor. Die Methode basiert auf dem St. Galler Management Modell und ist dementsprechend in eine strategische- und eine operationale Ebene unterteilt. Die strategische Ebene soll sicherstellen, dass eine zielgerichtete Umsetzung in der Praxis erfolgt. Jedoch wird in dem vorliegenden Paper nicht näher erläutert, wie die Implementierung in der Praxis erfolgt. [SCHU20d] Der Ansatz von JEON UND SCHUESSELBAUER zur Implementierung eines Digitalen Zwillings für eine Produktionslinie umfasst drei Schritte. Im ersten Schritt wird mithilfe einer diskreten Event-Simulation ein Simulationsmodell erzeugt. Im zweiten Schritt wird der bidirektionale Datenaustausch mit dem Steuerungssystem der Produktionslinie hergestellt, um im dritten Schritt eine Visualisierung für die Anwendung zu realisieren. Die Umsetzbarkeit des Ansatzes wird anhand einer vollautomatisierten Matrix-Produktion demonstriert. Eine detaillierte Vorgehensweise, um die Methode allgemeingültig anwendbar zu machen, wird allerdings nicht präsentiert. [JEON20] LU ET AL. integrieren den Digitalen Zwilling in ein fünfstufiges Vorgehen zur Umgestaltung eines Wertstroms. Dabei wird ein zukünftiger Soll-Zustand im Sinne des Wertstromdesigns (vgl. Abschnitt 2.2.2.2) definiert, der in ein Simulationsmodell überführt wird. Mithilfe von Ist-Daten aus dem Wertstrom wird ein Ist-Modell erstellt. Durch den Vergleich zwischen Soll- und Ist-Zustand können Maßnahmen definiert werden, um den Wertstrom in Richtung des Soll-Zustands zu verbessern. Auch in diesem Ansatz fehlt eine ausführliche Vorgehensweise zur Implementierung des Digitalen Zwillings in der Praxis, stattdessen wird dieser als gegeben angenommen. [LU21]

Die vorgestellten methodischen Ansätze zur Integration digitaler Zwillinge in das Wertstrommanagement verdeutlichen das Fehlen detaillierter Vorgehensweisen für die technische Umsetzung in betrieblichen Kontexten. Obwohl sie theoretische Rahmenbedingungen und Simulationsmodelle bieten, fehlen spezifische Implementierungsrichtlinien, die die Praxistauglichkeit dieser Methoden in realen Produktionsumgebungen sicherstellen. Dieses Defizit unterstreicht den Bedarf an weiterführender Forschung und Entwicklung, um effektive, praxisorientierte Implementierungsmethoden zu etablieren, die ein datenbasiertes Wertstrommanagement realisierbar machen.

#### 2.4.4 Zwischenfazit

Das Konzept des Digitalen Zwillings ist in der Literatur nicht eindeutig definiert. Dennoch lassen sich drei Kernelemente identifizieren: das physische Objekt, das virtuelle Objekt und der bidirektionale Daten- und Informationsaustausch zwischen beiden Objekten (vgl. Abschnitt 2.4.1.1). Obwohl das Konzept des Digitalen Zwillings viele Stärken aufweist, gibt es insbesondere bei der praktischen Umsetzung unterschiedliche Herausforderungen, die bei der weiteren Entwicklung zu berücksichtigen sind (vgl. Abschnitt 2.4.1.2). Daher bezeichnet der sog. Digitale Wertstromzwilling im Kontext des Wertstrommanagements die virtuelle Modellierung und Darstellung einer ganzheitlichen Sicht auf die Zusammenhänge und Wechselwirkungen in einem Wertstrom (vgl. Abschnitt 2.4.2). Die Verknüpfung des Digitalen Zwillings mit der Wertstrommethode kann in konzeptuelle und methodische Ansätze unterteilt werden. Die konzeptuellen Ansätze wiederum sind in technische- und organisatorische Konzepte unterteilbar (vgl. Abschnitt 2.4.3).

Die Analyse der bestehenden Ansätze zeigt, dass die konzeptuellen Ansätze sich insbesondere auf die technische Ausgestaltung des Digitalen Zwillings im Produktionskontext konzentrieren. Allen Ansätzen ist jedoch gemein, dass sie die unterschiedlichen Gegebenheiten in Unternehmen nicht berücksichtigen und daher *keine Allgemeingültigkeit* vorweisen können. Um in Zukunft eine allgemeingültige Umsetzung eines Digitalen Zwillings im Kontext des Wertstrommanagements zu ermöglichen, sind daher generalisierbare Handlungsempfehlungen erforderlich, welche die Anwendenden bei der praktischen Implementierung unterstützen. Aus diesem Grund lautet der dritte Forschungsbedarf wie folgt:

**Forschungsbedarf 3:** Formulierung allgemeingültiger Handlungsempfehlungen zur Integration des Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement.

Um die Handlungsempfehlungen erfolgreich in der Praxis anwenden zu können, ist die Unterstützung durch ein methodisches Vorgehen erforderlich, welches die Anwender:innen mit operativen Leitlinien bei der praktischen Umsetzung anleitet. Obwohl bereits methodische Ansätze in der Literatur vorhanden sind, welche die Implementierung eines Digitalen Zwillings in der Produktion beschreiben, sind diese *nicht im Kontext des Wertstrommanagements angesiedelt* und weisen zudem eine *unzureichende Detailtiefe* auf,

um eine umfassende praktische Anwendung zu ermöglichen. Daher ergibt sich der vierte Forschungsbedarf zu:

**Forschungsbedarf 4:** Entwicklung einer Methode zur Implementierung eines Digitalen Zwillings für das Wertstrommanagement in der industriellen Praxis.

## 2.5 Fazit zum Stand der Wissenschaft und Technik

Im vorliegenden Stand der Wissenschaft und Technik werden die Grundlagen der schlanken Produktion (vgl. Abschnitt 2.1), des Wertstrommanagements (vgl. Abschnitt 2.2), der Digitalisierung der Produktion (vgl. Abschnitt 2.3) sowie das Konzept des Digitalen Zwillings (vgl. Abschnitt 2.4) erläutert.

Es wird identifiziert, dass das Wertstrommanagement die kontinuierliche Anwendung, der in der industriellen Praxis weit verbreiteten Wertstrommethode, darstellt und eine grundlegende Methode bei der Realisierung einer schlanken Produktion ist (vgl. Abschnitt 2.2.2). Um die kontinuierliche Anwendung zu gewährleisten, ist eine Weiterentwicklung der Methode zu einem *datenbasierten Wertstrommanagement* von entscheidender Bedeutung, da auf diese Weise die bestehenden Schwächen unter Zuhilfenahme von Industrie 4.0-Technologien adressiert werden können (vgl. Abschnitt 2.2.4).

Ziel ist es, die Synergien zwischen Digitalisierung und schlanker Produktion (vgl. Abschnitt 2.3.2) zu nutzen und Prozessverbesserungen im Sinne der fünf Prinzipien schlanker Produktionssysteme zu erzielen. Hierfür wurden bestehende I 4.0-Technologien mit den Methoden der schlanken Produktion verglichen, um den vielversprechendsten Ansatz für die Weiterentwicklung der Wertstrommethode zu einem datenbasierten Management-Ansatz auszuwählen (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Dabei hat sich das Konzept des Digitalen Zwillings (vgl. Abschnitt 2.4.1) als besonders vielversprechend erwiesen. Der Digitale Wertstromzwilling (vgl. Abschnitt 2.4.2) besitzt das Potenzial, die Schwächen der Wertstrommethode zu adressieren und somit zur Weiterentwicklung hin zu einem digitalisierten Wertstrommanagement beizutragen. Die bestehende Literatur (vgl. Abschnitt 2.4.3) legt nahe, dass zum aktuellen Zeitpunkt kein Ansatz existiert, der Anwender:innen bei der praktischen Implementierung eines Digitalen Wertstromzwillings unterstützt. Die Wirksamkeit der bestehenden Ansätze wird an individuellen Beispielen erprobt, eine Verallgemeinerung findet jedoch nicht statt. Demnach ist die Entwicklung allgemeingültiger Handlungsempfehlungen, welche die Übertragbarkeit des Digitalen Wertstromzwillings auf verschiedene Wertströme in unterschiedlichen Unternehmen gewährleistet, notwendig. Um die praktische Anwendbarkeit der Handlungsempfehlungen sicherzustellen, ist zudem eine Methode erforderlich, welche die Anwender:innen bei der praktischen Umsetzung in der industriellen Praxis unterstützt. (vgl. Abschnitt 2.4.4).



---

### 3 FORSCHUNGSKONZEPTION

---

Der im Stand der Wissenschaft ermittelte Forschungsbedarf stellt den Ausgangspunkt für das folgende Kapitel dar. Zunächst wird der Forschungsbedarf in spezifische Forschungsziele überführt (Abschnitt 3.1). Daraufhin werden formale Anforderungen an das zu entwickelnde Gestaltungsmodell und die Methode definiert (Abschnitt 3.2), bevor die der Arbeit zugrundeliegende Forschungskonzeption vorgestellt (Abschnitt 3.3) wird. Abschließend erfolgt eine Abgrenzung des Anwendungsbereichs (Abschnitt 3.4).

#### 3.1 Forschungsziel

Basierend auf den im Stand der Wissenschaft ermittelten Forschungsbedarfen (vgl. Abschnitte 2.2.6, 2.3.4, 2.4.4) lässt sich das nachfolgende Forschungsziel ableiten:

Das **Ziel der Forschungsarbeit** besteht darin, die Wertstrommethode mithilfe des Konzepts des Digitalen Zwillings weiterzuentwickeln und sie zu einem datenbasierten Management-Ansatz zu erweitern.

Um den Aufbau der Forschungsarbeit und die zugehörigen Entwicklungsschritte zu strukturieren, wird das übergeordnete Forschungsziel in *drei Teilziele* unterteilt. Auf diese Weise wird eine eindeutige Richtung für die Entwicklung der Lösungen, die sowohl den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn als auch die praktische Anwendbarkeit des datenbasierten Wertstrommanagements fördern, sichergestellt.

**Teilziel 1** bildet den Ausgangspunkt für die Entwicklung. Es ist zu analysieren, welche organisatorischen Aufgaben im Rahmen des Wertstrommanagements bestehen und mit welcher Regelmäßigkeit und Relevanz sie aus Sicht der industriellen Praxis durchgeführt werden sollten. Diese Analyse soll den Bedarf für die digitale Unterstützung aufzeigen und dient somit als Grundlage für die Entwicklung eines technischen Rahmenwerks für das datenbasierte Wertstrommanagement.

**Teilziel 2** baut auf den Ergebnissen von Teilziel 1 auf und zielt darauf ab, ein technisches Gestaltungsmodell für den Digitalen Zwilling eines Wertstroms zu entwickeln. Ziel ist es, ein Gestaltungsmodell zu schaffen, das die spezifischen Anforderungen und Rahmenbedingungen der industriellen Praxis integriert und bei der Implementierung eines Digitalen Wertstromzwillings unterstützt. Dabei umfasst es die aus Sicht der industriellen Praxis als relevant eingestuften Gestaltungselemente.

**Exkurs: Gestaltungsmodell**

Ein *Modell* ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder bereits existierenden Systems in der Realität [VDI16]. Hierzu werden Bestandteile und Zusammenhänge des realen Systems in das Modell integriert, wobei eine Reduktion auf die für die Anwendenden relevanten Inhalte erfolgt [STAC73]. Eine vollständige Erfassung aller Elemente und Zusammenhänge des realen Systems in einem Modell ist nicht realistisch, weshalb die Vereinfachung der Realität in einem Modell zulässig ist [CHMI94].

Modelle werden in der Literatur anhand der Zielsetzung und des Zwecks klassifiziert. Es existieren Beschreibungs-, Erklärungs- und Gestaltungs- bzw. Entscheidungsmodelle. [BAND10, STAC73] Während Beschreibungs- und Erklärungsmodelle die für Entscheidungen relevanten Zusammenhänge und Informationen erklären [BAND10], sind Gestaltungsmodelle sog. *Soll-Modelle*. Diese ermöglichen eine systemorientierte Planung und Gestaltung komplexer Systeme [SCHE94]. Dadurch können große Systeme in einzelne Teile untergliedert und handhabbarer gemacht werden. Dabei handelt es sich bei einem Gestaltungsmodell um ein lebendiges Objekt, welches stetig weiterentwickelt werden kann. Zusätzlich liefern Gestaltungsmodelle Handlungsalternativen und Entscheidungsempfehlungen für die Anwendenden [PATZ82]. Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich für die vorliegende Arbeit die Verwendung eines Gestaltungsmodells [BEAU11].

**Teilziel 3** befasst sich mit der Überführung des technischen Gestaltungsmodells in eine in der industriellen Praxis anwendbare Methode zur Implementierung eines Digitalen Zwillings für das datenbasierte Wertstrommanagement. Dabei ist ein Ansatz zu entwickeln, der die Anwender:innen durch eine logische und operative Vorgehensweise bei der Anwendung des Gestaltungsmodells unterstützt, um die effektive Anwendung des Gestaltungsmodells in der industriellen Praxis zu ermöglichen.

**Exkurs: Methode**

Im DUDEN wird eine *Methode* als „auf einem Regelsystem aufbauendes Verfahren zur Erlangung von [wissenschaftlichen] Erkenntnissen oder praktischen Ergebnissen“ bezeichnet [DUDE23]. Methoden dienen demnach stets der Erreichung eines bestimmten Zieles [HÄDE19]. Dabei wird die Abfolge bestimmter Tätigkeiten oder die Art und Weise, wie diese durchzuführen sind, formal beschrieben. Methoden haben in der Regel einen stark operativen Charakter und sind oftmals für einen spezifischen Anwendungsfall ausgelegt. Sie stellen ein Hilfsmittel dar, um die Komplexität des Anwendungsfalls für die Methoden-anwender:innen besser handhabbar zu machen. Insgesamt führt der Einsatz von Methoden dazu, die definierten Ziele effizienter zu erreichen. [LIND09]

Abbildung 17 fasst das Forschungsziel sowie die drei Teilziele zusammen und ordnet sie in die Kapitelstruktur der vorliegenden Arbeit ein.



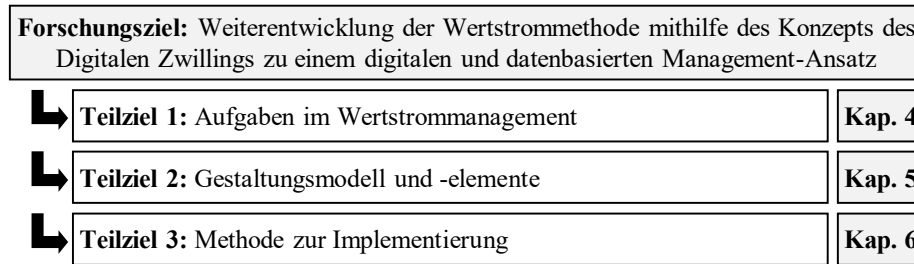


Abbildung 17: Zusammenhang Forschungsziel und Teilziele

### 3.2 Formale Anforderungen

Um die Anwendbarkeit in der industriellen Praxis sicherzustellen, werden im Folgenden zunächst formale Anforderungen an das Gestaltungsmodell (Abschnitt 3.2.1) und die Methode (Abschnitt 3.2.2) definiert. Diese werden im Rahmen der Konzeption des Gestaltungsmodells durch inhaltliche Anforderungen aus den Bereichen Wertstrommanagement und Digitaler Zwilling erweitert (Abschnitt 5.1.1).

#### 3.2.1 Formale Anforderungen an das Gestaltungsmodell

Um ein Modell und seine Funktionsweise beurteilen zu können, ist es essenziell, auf etablierte Kriterien zurückzugreifen, welche in der wissenschaftlichen Literatur als elementar für die Modellbewertung anerkannt sind. Aus diesem Grund wurden die in Tabelle 8 aufgeführten fünf formalen Anforderungen ausgewählt, da sie eine umfassende Bewertung der Funktionsweise von Modellen ermöglichen.

Tabelle 8: Formale Anforderungen an das Gestaltungsmodell

Nr.		<b>Formale Anforderungen</b>	<b>Quellen</b>
F-G-1	<b>Relevanz</b>	Es sollen nur Sachverhalte modelliert werden, die für den zugrunde liegenden Modellierungszweck relevant sind. Eine klare Definition der Modellierungsziele ist unabdingbar.	[BECK12]
F-G-2	<b>Klarheit</b>	Der Grundsatz der Klarheit zielt darauf ab, das Modell verständlich zu gestalten. Leichte Lesbarkeit, Anschaulichkeit und Verständlichkeit sind relevante Kriterien.	[BECK12]
F-G-3	<b>Vollständigkeit</b>	Im Modell sollen alle für die Stakeholder relevanten Informationen abgebildet werden.	[MOOD94, SCHÜ98]
F-G-4	<b>Flexibilität</b>	Das Modell soll mit geringem Aufwand nachträglich anpassbar sein.	[MOOD94, SCHÜ98]
F-G-5	<b>Implementierbarkeit</b>	Das Modell soll technisch, zeitlich und kostenmäßig implementierbar sein.	[MOOD94, SCHÜ98]

#### 3.2.2 Formale Anforderungen an die Methode

Neben den formalen Anforderungen an das Gestaltungsmodell sind in Tabelle 9 formale Anforderungen an die Methode definiert, um die Anwendbarkeit und Wirksamkeit der Methode in der industriellen Praxis sicherzustellen. Die Anforderungen sind in der Literatur etabliert und gewährleisten die allgemeine Anwendbarkeit der Methode.

Tabelle 9: Formale Anforderungen an die Methode

Nr.	Formale Anforderungen	Quellen
F-M-1	<b>Objektivität</b> Die Methode soll unabhängig von subjektiven Einflüssen der durchführenden Personen sein, sowohl bei der Durchführung als auch bei der Interpretation der Ergebnisse.	[FRIE90]
F-M-2	<b>Reliabilität</b> Die Methode soll unter gleichen Bedingungen wiederholt zum gleichen Ergebnis führen.	[NACH97, FRIE90]
F-M-3	<b>Anpassungsfähigkeit</b> Die Methode ist anpassbar, sofern neue Informationen oder Parameter eine Erweiterung oder Veränderung erfordern.	[LITT70]
F-M-4	<b>Generalisierbarkeit</b> Die Methode ist in verschiedenen Produktionsumgebungen sowie in unterschiedlichen Branchen anwendbar.	[FRIE90]
F-M-5	<b>Simplizität</b> Die Methode soll praktikabel und einfach anwendbar sein. Die unerfahrenen Anwendenden sollen durch einen klaren Lösungsweg zum Ziel geleitet werden.	[LITT70]

### 3.3 Forschungskonzeption

Im Rahmen der Forschungskonzeption werden die wissenschaftlich-formalen Grundlagen beschrieben, welche zur zielgerichteten Lösungsentwicklung in Bezug auf die in Abschnitt 3.1 definierten Forschungsziele dienen. Die Fragestellung ist im Schnittbereich der Ingenieurwissenschaften und der Betriebswirtschaftslehre im Themengebiet des Produktionsmanagements einzuordnen. Dieser Forschungsbereich wird den *angewandten Wissenschaften* zugeordnet, wobei Probleme aus der Praxis adressiert werden, für deren Lösung zum jetzigen Zeitpunkt kein ausreichendes Wissen vorhanden ist [ULRI76]. Für Forschungsarbeiten in diesem Bereich bietet sich die *Strategie der angewandten Forschung* nach ULRICH an [ULRI84, SCHU13]. Das Vorgehen zur Erreichung des Forschungsziels wird dabei in die drei Phasen *Entdeckungszusammenhang*, *Begründungszusammenhang* und *Anwendungszusammenhang* unterteilt [ULRI76]. Der *Entdeckungszusammenhang* stellt dabei die konzeptuelle Basis dar, welche eine Abgrenzung des Untersuchungsbereiches sowie die konkrete Problemstellung beinhaltet, die adressiert werden soll. Die hierbei ermittelte Realität stellt dabei nicht den Untersuchungsgegenstand selbst dar, sondern ist die Realität der Ausgangssituation für zukünftige darauf aufbauende Realitäten, die im Forschungsprozess untersucht werden sollen. Im *Begründungszusammenhang* wird die ermittelte Realität der Ausgangssituation durch eine empirische Überprüfung validiert. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, unter welchen Bedingungen die im Entstehungszusammenhang gemachten Beobachtungen überprüft und verallgemeinert werden können. Im Rahmen der angewandten Wissenschaften steht insbesondere die praktische Anwendbarkeit von Handlungsanweisungen oder Modellen im Fokus. Im *Anwendungszusammenhang* erfolgt die praktische Umsetzung, Erprobung und Bewertung der entwickelten Handlungsanweisungen oder Modelle. Eine Anwendung im praktischen Umfeld des Untersuchungsbereiches ist dabei essenziell. [ULRI76] Abbildung 18 stellt die Strategie der angewandten Forschung dem Aufbau der vorliegenden Arbeit gegenüber und ordnet die einzelnen Phasen des Forschungsprozesses den jeweiligen Kapiteln zu.

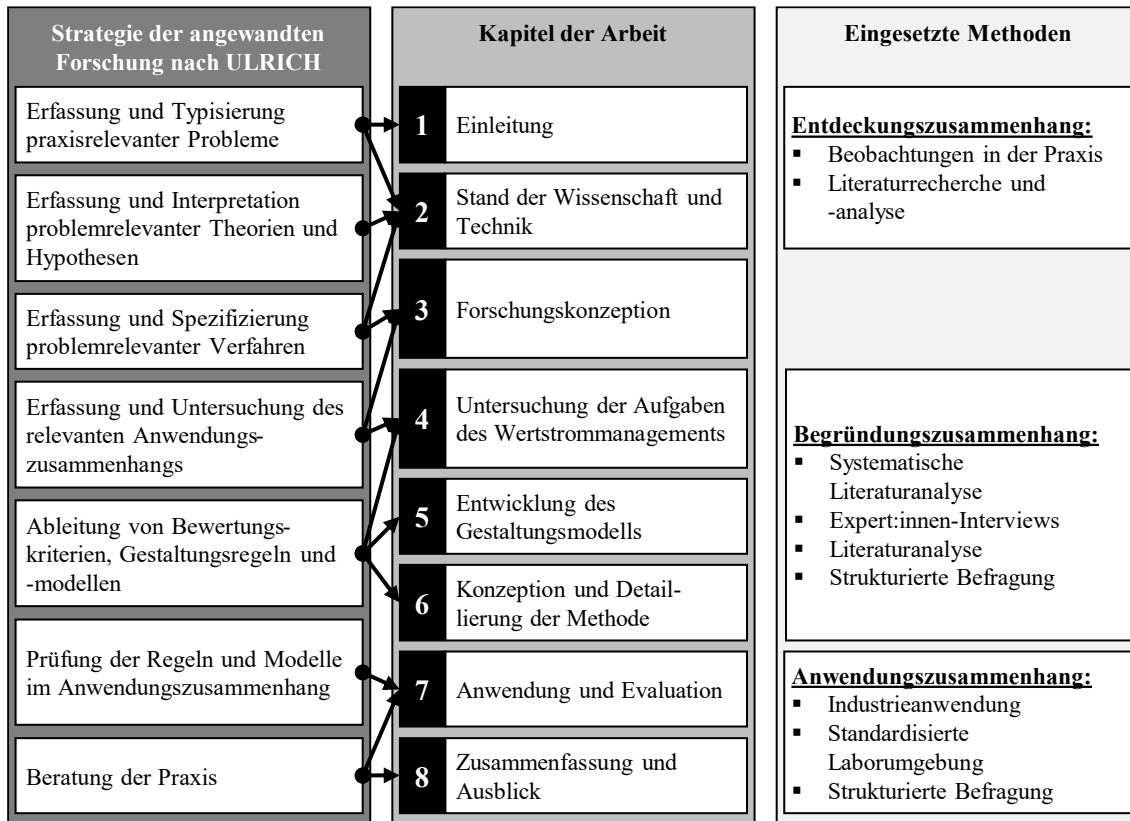


Abbildung 18: Forschungskonzeption der vorliegenden Arbeit (Eigene Darstellung in Anlehnung an [ULRI84, SCHU13])

Weiterhin werden die in der vorliegenden Forschungsarbeit verwendeten wissenschaftlichen Methoden in die drei Phasen eingeordnet.

### Entdeckungszusammenhang

*Beobachtungen in der Praxis* zeigen, dass dynamische Kundenanforderungen produzierende Unternehmen zu regelmäßigen Anpassungen ihrer Produktionssysteme zwingen. Aufgrund mangelnder Transparenz ist eine zielgerichtete Anpassung allerdings nicht möglich, wodurch Unternehmen ihren Wettbewerbsvorteil verlieren. Es zeigt sich, dass die etablierten Methoden der schlanken Produktion, insbesondere die Wertstrommethode, hierbei an ihre Grenzen stoßen. Eine *Literaturrecherche und -analyse* im Rahmen des zweiten Kapitels zeigt indes, dass die Unternehmen die mangelnde Transparenz durch die Digitalisierung der Produktion adressieren möchten. Es lässt sich schlussfolgern, dass eine Weiterentwicklung der Wertstrommethode in Kombination mit digitalen Technologien zu einer Verbesserung des beschriebenen Entdeckungszusammenhangs beitragen kann. Hierbei wird dem Konzept des Digitalen Zwillings das größte Potenzial zugeschrieben. Dieses gilt es, mithilfe der Strategie der angewandten Forschung zu erzielen.

### Begründungszusammenhang

Die im Entdeckungszusammenhang ermittelte Realität wird in der Phase des Begründungszusammenhangs weiter analysiert und detailliert. Hierfür dient eine *systematische*

*Literaturanalyse*, welche die Aufgaben des Wertstrommanagements aus wissenschaftlicher Sicht analysiert. Hieran anknüpfende *Expert:innen-Interviews* bestätigen die praktische Relevanz der identifizierten Aufgaben. Weiterhin werden auf Basis der Ergebnisse ein technisches Gestaltungsmodell sowie eine Methode zur Implementierung des Digitalen Zwillings eines Wertstroms entwickelt. Die Entwicklung wird unterstützt durch eine *Literaturanalyse* sowie eine *strukturierte Befragung*.

### **Anwendungszusammenhang**

Im Rahmen des Anwendungszusammenhangs erfolgt die praktische Umsetzung, Erprobung und Bewertung des Gestaltungsmodells und der Methode. Hierzu wird das Gestaltungsmodell in *zwei Industrieanwendungen* erprobt. Die durchgängige Anwendung der Methode findet in einer *standardisierten Laborumgebung* unter kontrollierten Rahmenbedingungen statt. Die Bewertung der inhaltlichen und formalen Anforderungen erfolgt im Anschluss auf Basis einer *strukturierten Befragung*.

### **3.4 Abgrenzung des Anwendungsbereiches**

Ziel der Arbeit ist es, die Wertstrommethode durch die Integration des Konzepts des Digitalen Zwillings zu einem datenbasierten Management-Ansatz weiterzuentwickeln. Um dieses Ziel zu erreichen, werden folgende Abgrenzungen vorgenommen:

**Hinsichtlich der Industrie:** Der Einsatz der Wertstrommethode ist in vielen Branchen, wie der Bauindustrie, der Prozessindustrie oder dem Gesundheitswesen etabliert und wird regelmäßig angewendet [ROME17]. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch die Weiterentwicklung der Methode speziell für Unternehmen der Produktionswirtschaft angestrebt [KELL22b]. Der Fokus liegt dabei auf der Herstellung diskreter Güter, da dies eine klare Zuordnung der Datenpunkte zu einzelnen Gütern ermöglicht.

**Hinsichtlich des Betrachtungsrahmens des Wertstroms:** Die Wertstrommethode kann in unterschiedlichen Granularitätsstufen angewendet werden und ermöglicht bspw. sogar die Darstellung unternehmensübergreifender Wertströme [OBER18]. In dieser Arbeit wird jedoch der in der Praxis übliche Betrachtungsrahmen gewählt – ein Wertstrom innerhalb einer einzelnen Fabrik für eine definierte Produktfamilie [ROTH99] Daher ist die Zuordnung der Datenpunkte lediglich innerhalb der IT-Systeme des Unternehmens notwendig.

**Hinsichtlich der verfügbaren Datenbasis:** Eine umfangreiche Datenbasis ist unerlässlich für die Implementierung eines Digitalen Zwillings. Aus diesem Grund werden das Gestaltungsmodell und die Methode speziell für Unternehmen entwickelt, die einen hohen Digitalisierungs-Reifegrad vorweisen [KETT17]. Dazu ist es erforderlich, dass historische Auftrags- bzw. Bewegungsdaten einzelner Produkte vorliegen und den einzelnen Prozessschritten eines Wertstroms zugeordnet werden können. Darüber hinaus müssen prozessspezifische Daten wie Rüstzeiten, Ausschuss oder technische Verfügbarkeiten je Prozessschritt erfasst werden.

## 4 UNTERSUCHUNG DER AUFGABEN DES WERTSTROMMANAGEMENTS

Kapitel 4 adressiert das erste Forschungsziel, die *Identifikation der Aufgaben des Wertstrommanagements*. Um den Praxisbezug sicherzustellen, wurde ein Expert:innen-Interview durchgeführt. Zunächst wird das Vorgehen zur Bestimmung der Aufgaben (Abschnitt 4.1) erläutert. Die gewonnenen Erkenntnisse erlauben es, die aus Sicht der industriellen Praxis essenziellen Aufgaben zu identifizieren (Abschnitt 4.2). Aufbauend hierauf wird im Anschluss der notwendige Datenbedarf der jeweiligen Aufgaben für die Bereitstellung durch den Digitalen Zwilling ermittelt (Abschnitt 4.3), bevor ein Zwischenfazit gezogen wird (Abschnitt 4.4).

### 4.1 Vorgehen zur Bestimmung der Aufgaben

Für die Bestimmung der Aufgaben wurde ein leitfadengestütztes Expert:innen-Interview durchgeführt. Das Vorgehen zur Entwicklung des Leitfadens wird in Abschnitt 4.1.1 erläutert. Die Auswahl der Expert:innen wird in Abschnitt 4.1.2 beschrieben. Hierbei wurden die nachfolgenden Ausführungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitet und wurden bereits in [FRIC23] veröffentlicht.

#### 4.1.1 Vorgehen

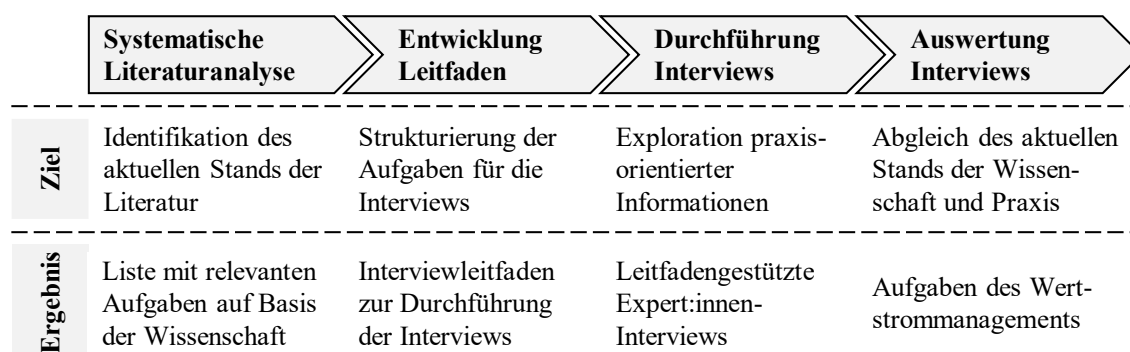


Abbildung 19: Vorgehen zur Ermittlung der Aufgaben und Definitionen

Das Vorgehen zur Ermittlung der Aufgaben zeigt Abbildung 19. Im ersten Schritt wurden mithilfe einer *systematischen Literaturanalyse* 42 Artikel identifiziert, die sich mit den Aufgaben und existierenden Definitionen des Wertstrommanagements auseinandersetzen. Die zugehörige Dokumentation findet sich in Anhang A.2.

Die identifizierten wissenschaftlichen Beiträge bilden die Grundlage für die Bestimmung einer Liste mit relevanten Aufgaben des Wertstrommanagements. Hierauf aufbauend wird ein Leitfaden entwickelt, welcher einen Abgleich der wissenschaftlichen und praktischen Perspektive ermöglicht. Der *Leitfaden* (vgl. Anhang A.3) beinhaltet Detailfragen zu den identifizierten Aufgaben und Definitionen und dient als Grundlage für die

*Durchführung der Expert:innen-Interviews.* Die Auswahl und Beschreibung der Expert:innen erfolgt im nächsten Abschnitt.

#### 4.1.2 Auswahl und Beschreibung der Expert:innen

Die Auswahl der Expert:innen ist von besonderer Bedeutung, da sie über die Art und Qualität der erhaltenen Informationen entscheidet. Gemäß GLÄSER UND LAUDEL sollten bei der Auswahl folgende Fragen berücksichtigt werden [GLÄS09]:

- Wer verfügt über die relevanten Informationen?
- Wer ist am ehesten in der Lage, präzise Informationen zu geben?
- Wer ist am ehesten bereit, Informationen zu geben?

Durch die Beantwortung der Fragen ergeben sich für die vorliegende Forschungsarbeit die folgenden Gütekriterien zur Auswahl der Expert:innen:

- Die Expert:innen befassen sich aktiv mit der Wertstromorganisation und der Implementierung einer schlanken Produktion in Unternehmen (*Amts-dauer*).
- Die Expert:innen besitzen mindestens fünf Jahre Erfahrung mit der Wertstrommethode und kennen deren Stärken und Schwächen (*Erfahrung mit WSMM*).
- Die Auswahl der Expert:innen deckt verschiedene Branchen, Funktionsbereiche und Hierarchieebenen in Unternehmen ab (*Geschäftsfeld*).
- Die Expert:innen sind selbst Wertstrommanager:innen oder als Berater:innen tätig, um eine ganzheitliche Perspektive zu gewährleisten (*Funktionsbereich*).

Tabelle 10: Expert:innen Auswahl

	Expert:in 1	Expert:in 2	Expert:in 3	Expert:in 4	Expert:in 5
<b>Amts-dauer [a]</b>	3	5 / 12	17	2 / 7,5	10 / 2
<b>Erfahrung mit WSMM [a]</b>	10	20	10	10	10
<b>Geschäftsfeld</b>	Elektronik	Electronic Manufacturing Services	Elektronik	Beratung	Messtechnik
<b>Funktionsbereich</b>	Lean Production Manager:in	Ehem. Wertstrommanager:in / Lean Berater:in	Produktionsleiter:in	Ehem. Wertstrommanager:in / Lean Berater:in	Leitung Lean Production & Head of Global Lean Management

In Tabelle 10 sind die Gütekriterien für die fünf Expert:innen aufgeführt, die für die Interviews ausgewählt wurden. Alle Expert:innen weisen mindestens zehn Jahre Erfahrung im Wertstrommanagement auf und sind in ihren aktuellen Funktionen weiterhin eng mit der Wertstrommethode verbunden. Sie stammen aus den Geschäftsfeldern Elektronik, Beratung und Messtechnik und besitzen in ihren Funktionen entweder einen direkten Produktionsbezug, z. B. als Lean Production Manager:in oder als Produktionsleiter:in oder sind als Berater:innen für Themen rund um die schlanke Produktion im Einsatz. Die

Dauer der Interviews lag zwischen 60 und 90 Minuten und ist in in [FRIC21b] dediziert nachzuvollziehen.

### 4.2 Aufgaben des Wertstrommanagements

Abbildung 20 fasst die identifizierten Aufgaben des Wertstrommanagements inkl. bestehender Herausforderungen zusammen.

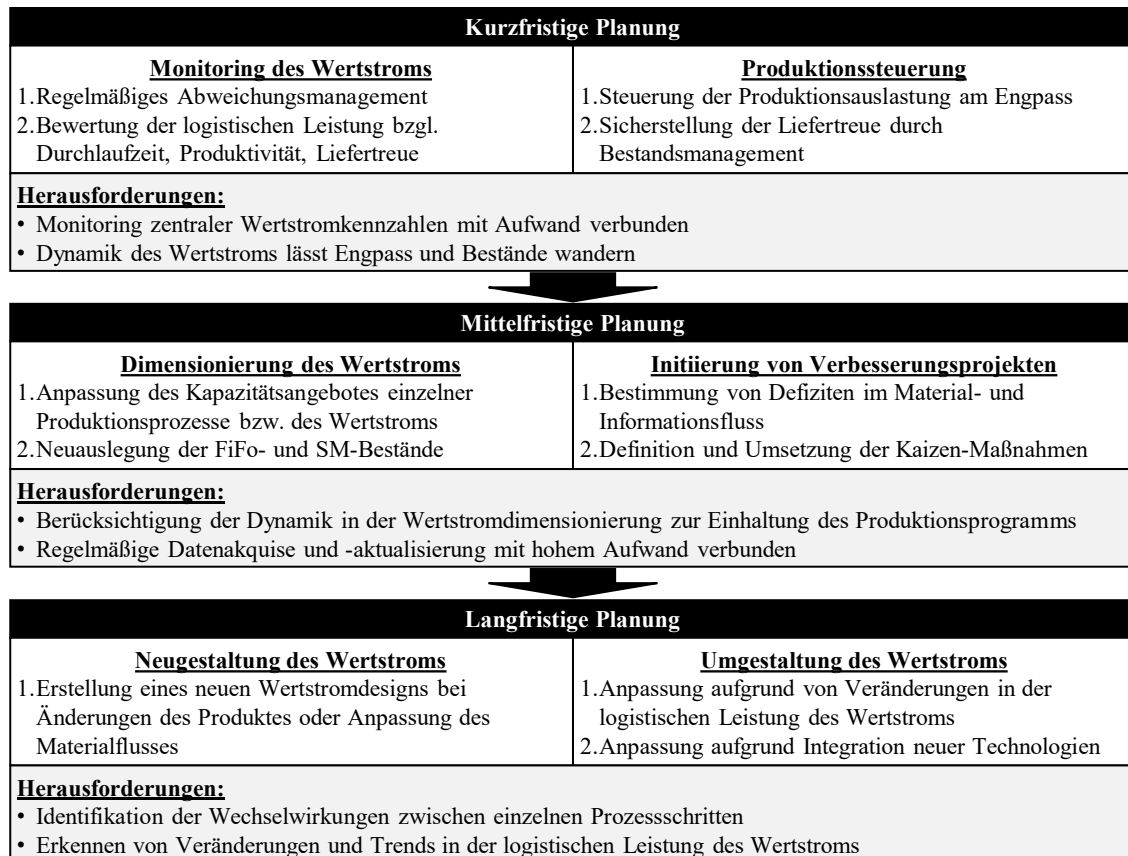


Abbildung 20: Aufgaben des Wertstrommanagements nach [FRIC23]

Die Interviews verdeutlichen, dass die Expert:innen bei einer detaillierten Betrachtung einzelner Aufgaben Unterschiede identifizieren [FRIC21b]. Dennoch lässt sich ein einheitliches Verständnis hinsichtlich des Umfangs und den zeitlichen Dimensionen der Aufgaben feststellen. Diese können, in Anlehnung an [ERLA20], in die drei Aufgabenhorizonte *kurzfristige-*, *mittelfristige-* und *langfristige Planung* untergliedert werden. Bei den kurzfristigen Aufgaben waren sich die Expert:innen einig, dass das Wertstrommanagement im operativen Tagesgeschäft zwei Aufgaben erfüllen muss – das *Monitoring des Wertstroms* und die *Produktionssteuerung* (vgl. Abschnitt 4.2.1). Für die mittelfristige Planung zählen laut den Expert:innen die *Dimensionierung des Wertstroms* sowie die *Initiierung von Verbesserungsprojekten* zu den Aufgaben (vgl. Abschnitt 4.2.2). Die langfristige Planung im Rahmen des Wertstrommanagements befasst sich mit der Weiterentwicklung des Wertstroms in Richtung des definierten Nordsterns. Hierbei unterstützen zwei Aufgaben: die *Neugestaltung des Wertstroms* und die *Umgestaltung des Wertstroms*

(vgl. Abschnitt 4.2.3). Die identifizierten Herausforderungen bestätigen die in Abschnitt 2.2.3.2 ermittelten Schwächen der Wertstrommethode. Die Verbindung wird in den jeweiligen Abschnitten aufgezeigt.

#### 4.2.1 Kurzfristige Planung

Bei der kurzfristigen Planung sind sich die Expert:innen einig, dass das *Monitoring des Wertstroms* und die *Produktionssteuerung* erfüllt werden müssen.

##### **Monitoring des Wertstroms**

Für das kontinuierliche Monitoring des Wertstroms ist es das Ziel, ein regelmäßiges *Abweichungsmanagement* zu implementieren. Dieses zielt darauf ab, durch den Vergleich von Soll- und Ist-Werten, zeitnah Störungen im betrachteten Wertstrom zu detektieren. Das übergeordnete Ziel dabei ist es, die richtigen Produkte, den sog. Produktmix, in der richtigen Menge zum definierten Liefertermin zur Verfügung zu stellen. Diese Zielsetzung wird durch die *Bewertung der logistischen Leistung* anhand der Schlüsselkennzahlen des Wertstroms – Durchlaufzeit, Produktivität und Liefertreue – unterstützt. Im Rahmen dieser Aufgabe steht das Wertstrommanagement vor der Herausforderung, dass das tägliche Monitoring der Kennzahlen und das regelmäßige Abweichungsmanagement sowie die Definition von Maßnahmen zur Problemlösung aufgrund der Statik der Wertstrommethode mit hohem personellem Aufwand verbunden ist (vgl. Tabelle 2, Schwächen 1-3). Nach Aussage der Expert:innen ist dies gegenwärtig nicht mit der notwendigen Regelmäßigkeit realisierbar. Dies kann in Zukunft nur gelingen, wenn digitale Technologien zum Einsatz kommen, welche ein kontinuierliches Monitoring der zentralen Wertstromkennzahlen unterstützen.

##### **Produktionssteuerung**

Neben dem Monitoring des Wertstroms stellt die operative *Produktionssteuerung* die zweite zentrale Aufgabe des kurzfristigen Wertstrommanagements dar. Hierzu zählen insbesondere die Steuerung der *Produktionsauslastung am Engpass* sowie die Gewährleistung der Liefertreue durch ein *kontinuierliches Bestandsmanagement*. Abhängig vom Produktionstyp differenziert die Steuerungsaufgabe. So handelt es sich bspw. bei einer Make-to-Order-Produktion um das Management eines Auftragsbestandes, während in einer Make-to-Stock-Produktion das Bestandsmanagement in einem Fertigwarenlager essenziell ist. Da die Dynamik eines Wertstroms zum einen den Engpass aber auch die Bestände innerhalb der Produktion wandern lässt und diese von externen Einflussgrößen wie Wiederbeschaffungszeiten beeinflusst werden, steht das Wertstrommanagement vor der Herausforderung, diese Dynamik erfassen und abbilden zu können (vgl. Tabelle 2, Schwäche 2). Ein kontinuierliches, digitales Bestandsmanagement kann hierbei unterstützen.



#### 4.2.2 Mittelfristige Planung

Die Aufgaben des Wertstrommanagements im Rahmen der mittelfristigen Planung umfassen laut den Expert:innen die *Dimensionierung des Wertstroms* sowie die regelmäßige *Initiierung von Verbesserungsprojekten*. Das Ziel ist es, die Entwicklung des Wertstroms in Richtung des definierten Sollzustandes zu unterstützen (vgl. Abbildung 7).

##### **Dimensionierung des Wertstroms**

Zu den Aufgaben im Rahmen der Dimensionierung des Wertstroms zählen zum einen die *Anpassung des Kapazitätsangebotes* einzelner Produktionsprozesse bzw. des gesamten Wertstroms in Abhängigkeit der verfügbaren und benötigten Ressourcen. Zum anderen ist eine regelmäßige *Neuauslegung der Bestände* in den FiFo-Puffern (engl.: First-in-First-Out) oder Supermärkten notwendig, um die logistische Leistung des Wertstroms an die gegebenen Produktionsbedingungen anzupassen. Dabei stellt eine zentrale Herausforderung dar, dass die wechselnden Produktionsbedingungen eine Dynamik des Wertstroms verursachen, die bei der Dimensionierung berücksichtigt werden muss und eine regelmäßige Neuauslegung der Wertstromdimensionen zur Folge hat (vgl. Tabelle 2, Schwäche 2). Im Fokus hierbei muss immer die Erfüllung des Produktionsprogrammes unter Berücksichtigung der installierten Kapazitäten sowie der Personal- und Arbeitsplatzplanung stehen. Darüber hinaus muss die Flexibilität des Wertstroms erhalten bleiben, um auf unvorhergesehene Schwankungen der Nachfrage reagieren zu können, ohne die Lieferfähigkeit und -qualität zu beeinträchtigen. Dies bedingt ein Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Prozesskapazitäten, Materialfluss und Bestandsmanagement, um eine reaktionsfähige Produktionsumgebung zu gewährleisten.

##### **Initiierung von Verbesserungsprojekten**

Des Weiteren stellt die Initiierung von Verbesserungsprojekten einen zentralen Aspekt der mittelfristigen Planung dar. Hierbei werden zunächst *Defizite im Material- und Informationsfluss* bestimmt. Im Anschluss werden Maßnahmen zur Lösung der Defizite erarbeitet und deren Implementierung im Rahmen der Wertstromplanung koordiniert. Dies erfolgt analog zum Vorgehen der konventionellen Wertstrommethode. Allerdings ist es für eine objektive Analyse der Defizite elementar, dass eine regelmäßige Datenakquise und -aktualisierung der zentralen Wertstromkennzahlen erfolgt. Da die Aktualisierungsprozesse mit hohem personellem Aufwand verbunden sind, ist die Implementierung automatisierter Lösungen in diesem Kontext unabdingbar, um die Objektivität und Effizienz der Analyse zu gewährleisten und die Datenallokation zu optimieren (vgl. Tabelle 2, Schwächen 3 und 5). Dieser Ansatz befähigt das Wertstrommanagement, proaktiv im Sinne des PDCA-Zyklus statt reaktiv zu agieren und den Flussgrad des Wertstroms mittelfristig zu erhöhen. Zusätzlich trägt die Automatisierung zur Reduktion von Fehlern bei, da manuelle Eingriffe und Datenaufnahmen minimiert werden und die Datenintegrität gewährleistet wird.

### 4.2.3 Langfristige Planung

Die langfristige Planung befasst sich mit der Weiterentwicklung des Wertstroms hin zum definierten Nordstern. Hierbei wird zwischen der *Neugestaltung* und der *Umgestaltung des Wertstroms* differenziert. Die Unterschiede werden nachfolgend erläutert:

#### **Neugestaltung des Wertstroms**

Die Neugestaltung des Wertstroms bzw. die Erstellung eines *neuen Wertstromdesigns* wird notwendig, wenn eine signifikante Änderung im Produktportfolio ansteht, eine Anpassung des Materialflusses, bspw. aufgrund eines Umzuges, erforderlich ist oder proaktiv ein nächster Sollzustand auf dem Weg zum Nordstern, erreicht werden soll. Dabei gibt der definierte Nordstern die Rahmenbedingungen vor, welche das neue Wertstromdesign berücksichtigen muss. Die Herausforderung bei einer derartigen Neugestaltung des Wertstroms liegt in der detaillierten Erfassung der Wechselwirkungen zwischen den Prozessschritten, welche die Basis für die regelmäßige Neugestaltung des Wertstroms bilden. Diese umfassende Betrachtung ermöglicht es, nicht ausschließlich isolierte Verbesserungen einzelner Prozessschritte zu erzielen, sondern auch die Auswirkungen der Veränderungen auf den Wertstrom zu berücksichtigen. Demnach ist es essenziell, das Wertstromdesign nicht als statisches System, sondern als ein dynamisches und sich veränderndes System zu verstehen, welches einer kontinuierlichen Überprüfung und Anpassung bedarf, um langfristig den Nordstern zu erreichen (vgl. Tabelle 2, Schwäche 2). Um die Handlungsfähigkeit während der Neugestaltung zu unterstützen, können historische Daten des Wertstroms genutzt werden, um Dynamiken und Trends in der Leistung, wie z. B. saisonale Schwankungen, zu identifizieren und in der Gestaltung zu berücksichtigen.

#### **Umgestaltung des Wertstroms**

Im Vergleich zur Neugestaltung des Wertstroms spricht man von der Umgestaltung des Wertstroms, wenn *geänderte Parameter in der logistischen Leistung*, wie bspw. ein kürzerer Kundentakt oder die unternehmensinterne Zielvorgabe zur Reduktion der Durchlaufzeit, eine Anpassung des Materialflusses bedingen. Darüber hinaus kann ebenso die Integration einer neuen Technologie oder Maschine in den Wertstrom eine Anpassung des Wertstroms erforderlich machen. Die zentralen Herausforderungen, denen sich Wertstrommanager:innen stellen müssen, ist in diesem Zusammenhang das *Erkennen von Veränderungen und Trends in der logistischen Leistung* des Wertstroms. Eine zielgerichtete Anpassung des Material- oder Informationsflusses setzt voraus, dass der Anpassungsbedarf nicht nur frühzeitig erkannt, sondern auch adäquat quantifiziert wird (vgl. Tabelle 2, Schwäche 4). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind datengestützte Analysensysteme notwendig, welche eine kontinuierliche Evaluation der logistischen Leistung des Wertstroms ermöglichen (vgl. Tabelle 2, Schwäche 6). Zeitreihenanalysen können an dieser Stelle unterstützen, um beispielsweise sich verändernde Zykluszeiten einzelner Prozessschritte aufgrund neuer Technologien zu identifizieren und eine Anpassung der Folgeprozesse zu initiieren.

Die Herausforderungen innerhalb der drei Planungshorizonte zeigen die Notwendigkeit einer digitalen Darstellung der zentralen Leistungskennzahlen eines Wertstroms als entscheidendes Instrument zur Bewältigung der Herausforderungen. Eine solche Darstellung ermöglicht es Wertstrommanager:innen, zielgerichtete Anpassungen des Wertstroms auf Basis objektiver Daten umzusetzen. Um dies zu erreichen, ist eine differenzierte Datenerfassung und -bereitstellung erforderlich, die je nach Planungshorizont variiert. Die hieraus resultierenden Datenbedarfe werden im Folgenden auf Basis der vorherigen Ausführungen spezifiziert.

### 4.3 Datenbedarfe im Wertstrommanagement

Um die Herausforderungen zu adressieren und den Unterstützungsbedarf durch den Digitalen Zwilling des Wertstroms zu definieren, wird im Folgenden der notwendige Datenbedarf der jeweiligen Planungshorizonte und Aufgaben bestimmt. Hierzu dienen zum einen die in Abschnitt 4.2 erläuterten sechs Aufgaben des Wertstrommanagements sowie die in Abschnitt 2.3.3.1 identifizierten sieben allgemeingültigen Datentypen. Im Folgenden werden die spezifischen Datenbedarfe für den jeweiligen Planungshorizont detailliert. Eine Darstellung der Zusammenhänge findet sich in Tabelle 11.

Tabelle 11: Zusammenhang Aufgaben und Daten des Wertstrommanagements

Aufgaben des Wertstrommanagements		Daten des Wertstrommanagements						
		Lieferanten	Personal	Finanzen	Qualität	Produktion: <i>Produkt</i>	Produktion: <i>Prozess</i>	Kunden
<b>KP</b>	Monitoring des Wertstroms				✓	✓	✓	✓
	Produktionssteuerung				✓	✓	✓	✓
<b>MP</b>	Dimensionierung des Wertstroms	✓	✓		✓	✓	✓	✓
	Initiierung von Verbesserungsprojekten	✓	✓		✓	✓	✓	✓
<b>LP</b>	Neugestaltung des Wertstroms	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Umgestaltung des Wertstroms	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Im Rahmen der **kurzfristigen Planung** sind Daten aus den Bereichen *Qualität*, *Produkt*, *Prozess* und *Kunden* für das Monitoring des Wertstroms und die Produktionssteuerung von entscheidender Bedeutung und bilden die Grundlage für die Realisierung eines effizienten Wertstroms. Die gesammelten Daten für die kurzfristige Planung des Wertstrommanagements zielen darauf ab, eine Steigerung der Reaktionsfähigkeit durch frühzeitiges Erkennen von Abweichungen sowie eine Steigerung der Effizienz und Qualität des Wertstroms durch Bewertung der Wertstromleistung zu ermöglichen. Die Verbesserung der Leistung kann dabei maßgeblich durch eine Steuerung der Produktionsauslastung am Engpass erfolgen, welches gleichzeitig eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und Sicherstellung der Liefertreue bedeutet.

Die **mittelfristige Planung** des Wertstrommanagements zielt auf die Dimensionierung des Wertstroms sowie die Initiierung spezifischer Verbesserungsprojekte ab, um den aktuellen Ist-Zustand des Wertstroms in Richtung des definierten Soll-Zustandes weiterzuentwickeln. Um dies datenbasiert zu unterstützen, werden neben den bereits erwähnten Kategorien aus der kurzfristigen Planung – *Qualität, Produkt, Prozess, Kunden* – zwei weitere Datenkategorien benötigt. Die Dimensionierung eines Wertstroms umfasst zum einen die Anpassung des Kapazitätsangebots einzelner Prozessschritte sowie des Wertstroms als auch eine regelmäßige Neuauslegung der FiFo- und Supermarktbestände. Hierzu werden unter anderem Daten der *Lieferanten* benötigt. Durch weitere Informationen aus dem Bereich *Personal*, können einzelne Prozessschritte neudimensioniert und auf das notwendige Kapazitätsangebot angepasst werden. Ziel der regelmäßigen Dimensionierung und der Initiierung von Verbesserungsprojekten stellt die Steigerung des Flussgrades eines Wertstroms dar. Dies bedingt ebenso eine Steigerung der Effizienz durch eine Reduktion der Durchlaufzeit. Eine gezielte Initiierung von Verbesserungsprojekten, deren Potenziale im Rahmen des Monitorings eines Wertstroms kontinuierlich erscheinen, führt zu einer Reduktion von Verschwendungen im Wertstrom und dadurch indirekt zu einer Kostenreduktion. Sowohl die Steigerung des Flussgrades als auch die Reduktion der Durchlaufzeit haben darüber hinaus eine Steigerung der logistischen Leistung zur Folge.

Während in der kurz- und mittelfristigen Planung insbesondere die operative Verbesserung eines Wertstroms im Fokus steht, ist das Ziel der **langfristigen Planung** des Wertstrommanagements, mit der Neu- bzw. Umgestaltung des Wertstroms, auf die strategische Weiterentwicklung des Wertstroms ausgerichtet. Neben den sechs Datentypen, welche bereits für die kurz- und mittelfristige Planung relevant sind, sind für strategische Entscheidungen insbesondere Daten aus dem Bereich *Finanzen* von Bedeutung. Durch die gezielte Nutzung aller für den Wertstrom relevanten Daten trägt die langfristige Wertstromplanung zur Weiterentwicklung auf dem Weg zum Nordstern bei. Durch disruptive Veränderungen und kontinuierliche Verbesserung des Wertstroms wird die Weiterentwicklung unterstützt. Dies trägt unmittelbar zur Steigerung der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Wertstroms an veränderte Marktbedingungen und Kundenanforderungen bei.

#### 4.4 Zwischenfazit

Durch leitfadengestützte Expert:innen-Interviews konnten die für die Praxis relevanten Aufgaben des Wertstrommanagements identifiziert werden. Diese Aufgaben werden in drei Planungshorizonte unterteilt, welche jeweils zwei Aufgaben umfassen:

- **Kurzfristige Planung:** Monitoring des Wertstroms, Produktionssteuerung
- **Mittelfristige Planung:** Dimensionierung des Wertstroms, Initiierung von Verbesserungsprojekten
- **Langfristige Planung:** Neu- oder Umgestaltung des Wertstroms

Somit wurde das **erste Forschungsziel**, die *Identifikation der Aufgaben des Wertstrommanagements aus Sicht der Praxis*, erreicht.

Während der Identifikation der Aufgaben wurden darüber hinaus bestehende Herausforderungen für das Wertstrommanagement, welche einen digitalen Unterstützungsbedarf nahelegen, dokumentiert. Diese wurden im Anschluss zur Ableitung der Datenbedarfe für die digitale Unterstützung herangezogen. Die grundlegenden Datenbedarfe für ein datenbasiertes Wertstrommanagement stammen aus den folgenden sieben Bereichen: *Lieferanten, Personal, Finanzen, Qualität, Produkt, Prozess* und *Kunden*. Die Bereiche bestehen aus spezifischen Datenpunkten, welche im Rahmen des Wertstrommanagements digital erfasst werden müssen, um die kontinuierliche Verbesserung des Wertstroms zu ermöglichen.



## 5 ENTWICKLUNG DES GESTALTUNGSMODELLS

Im Folgenden wird auf Basis der Aufgaben und Datenbedarfe des Wertstrommanagements das Gestaltungsmodell für den Digitalen Zwilling eines Wertstroms entwickelt (vgl. Abbildung 21). Hierzu werden zunächst die Gestaltungsdimensionen und deren Gestaltungselemente bestimmt (Abschnitt 5.1), aus denen das Gestaltungsmodell konzipiert wird (Abschnitt 5.2). Eine Detaillierung mithilfe von Gestaltungsprinzipien erfolgt in Abschnitt 5.3. Auf diese Weise wird, wie in Abbildung 21 dargestellt, der Detaillierungsgrad zunehmend gesteigert. Im abschließenden Abschnitt 5.4 wird ein Zwischenfazit gezogen.

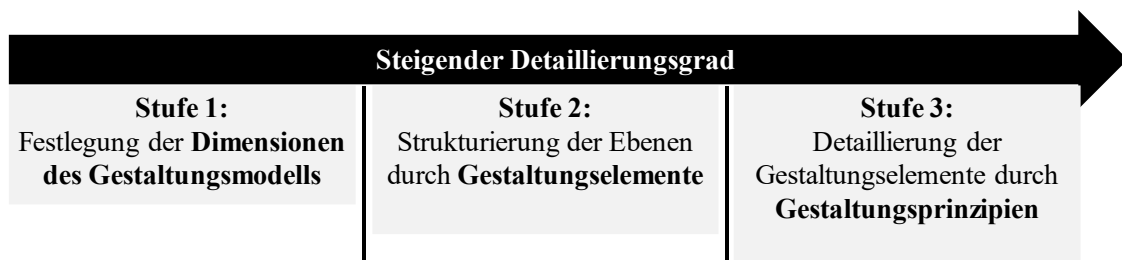


Abbildung 21: Vorgehen zur Entwicklung des Gestaltungsmodells

### 5.1 Bestimmung der Gestaltungsdimensionen und der -elemente

Wie in der Forschungskonzeption (Abschnitt 3.3) beschrieben, ist ein hoher Praxisbezug für die Entwicklung im Rahmen dieser Forschungsarbeit essenziell. Aus diesem Grund werden die Gestaltungsdimensionen und -elemente mittels einer strukturierten Befragung bestimmt. Zunächst werden literaturbasiert inhaltliche Anforderungen an das Gestaltungsmodell definiert (Abschnitt 5.1.1), bevor die strukturierte Befragung und deren Ergebnisse (Abschnitt 5.1.2) vorgestellt werden.

#### 5.1.1 Inhaltliche Anforderungen

Die inhaltlichen Anforderungen an das Gestaltungsmodell ergeben sich aus den zwei Bereichen *Wertstrommanagement* und *Digitaler Zwilling*. Das Vorgehen zur Definition der Anforderungen ist in Abbildung 22 dargestellt.

In der ersten Stufe werden im Stand der Wissenschaft und Technik mithilfe einer Literaturanalyse die *Schwächen der Wertstrommethode* (vgl. Abschnitt 2.2.3.2), die *Herausforderungen des Digitalen Zwillings* bei der Anwendung in der industriellen Praxis (vgl. Abschnitt 2.4.1.2) sowie der *Digitale Zwilling im Wertstrommanagement* (vgl. Abschnitt 2.4.2 und [FRIC22a]) identifiziert und Weiterentwicklungspotenziale abgeleitet. Die in der zweiten Stufe durchgeführten Expert:innen-Interviews fokussieren sich auf die *Aufgaben des Wertstrommanagements* sowie die mit der Implementierung verbundenen *Herausforderungen des Wertstrommanagements* (vgl. Abschnitt 4.2).

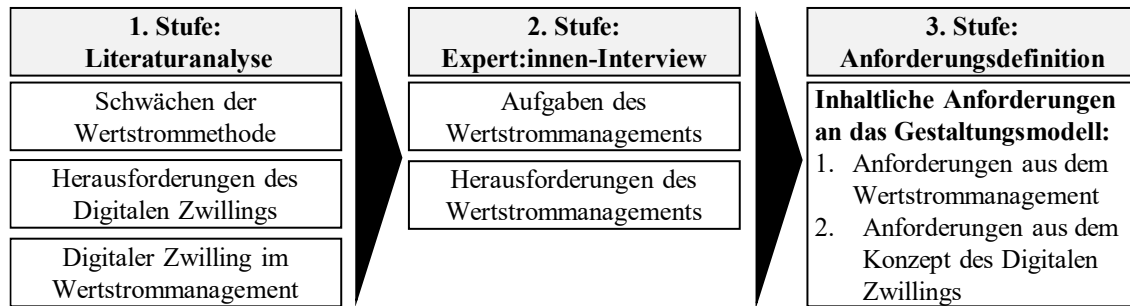


Abbildung 22: Vorgehen zur Definition der inhaltlichen Anforderungen

In der dritten Stufe erfolgt die Definition der *inhaltlichen Anforderungen an das Gestaltungsmodell*. Die Formulierung der Anforderungen erfolgt gemäß der Richtlinien für die Charakteristik von Anforderungen nach ISO 29148 [ISO18]. Die in Tabelle 12 zusammengefassten Anforderungen an das Gestaltungsmodell sind eindeutig formuliert, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Tabelle 12: Inhaltliche Anforderungen an das Gestaltungsmodell

Nr.	Inhaltliche Anforderungen	Bereich
<b>Wertstrommanagement</b>		
I1	Das Gestaltungsmodell ermöglicht ein aufwandsarmes Monitoring zentraler Wertstromkennzahlen.	<b>Kurzfristige Planung</b>
I2	Das Gestaltungsmodell ermöglicht die Identifikation des Engpasses und der Bestände.	
I3	Das Gestaltungsmodell berücksichtigt die Dynamik des Wertstroms bei der Dimensionierung der Wertstromkapazitäten.	<b>Mittelfristige Planung</b>
I4	Das Gestaltungsmodell reduziert den Aufwand für die regelmäßige Datenakquise und -aktualisierung.	
I5	Das Gestaltungsmodell ermöglicht die Identifikation von Wechselwirkungen einzelner Prozessschritte.	<b>Langfristige Planung</b>
I6	Das Gestaltungsmodell ermöglicht das Erkennen von Veränderungen und Trends in der Leistung des Wertstroms.	
<b>Digitaler Zwilling</b>		
I7	Das Gestaltungsmodell besteht aus den drei Dimensionen: physische Ebene, virtuelle Ebene und Verbindungsebene.	<b>Allgemein</b>
I8	Das Gestaltungsmodell ermöglicht die Datenakquise in der Produktion.	<b>Physische Ebene</b>
I9	Das Betrachtungsobjekt in der physischen Ebene ist ein Wertstrom von Rampe zu Rampe.	
I10	Das Gestaltungsmodell ermöglicht die kontinuierliche Datenerfassung und -übertragung in die virtuelle Ebene.	<b>Verbindungsebene</b>
I11	Das Gestaltungsmodell ermöglicht einen Informationsfluss aus der virtuellen in die physische Ebene.	
I12	Das Gestaltungsmodell sieht eine Datenspeicherung vor.	<b>Virtuelle Ebene</b>
I13	Das Gestaltungsmodell beinhaltet eine Datenmodellierung.	

### 5.1.2 Aufbau und Durchführung der strukturierten Befragung

Die nachfolgenden Ausführungen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitet und wurden in [FRIC24f] bereits veröffentlicht. Um die aus Sicht der industriellen Praxis



relevanten Gestaltungselemente eines Digitalen Zwilling für den Wertstrom zu ermitteln, wird eine strukturierte Befragung durchgeführt. Hierzu werden in der Feldforschung zwei Arten der Datenerhebung verwendet – die qualitative- und die quantitative Datenerhebung [DÖRI16]. In der vorliegenden Arbeit wird zunächst eine qualitative systematische Literaturanalyse durchgeführt, um die aus Sicht der Wissenschaft relevanten Gestaltungselemente für das Gestaltungsmodell zu ermitteln. Aufbauend auf den Ergebnissen wird eine quantitative Umfrage konzipiert. Hierbei werden die ermittelten Gestaltungselemente detailliert beschrieben und die Expert:innen entscheiden, ob sie die literaturbasiert ermittelten Elemente für die Praxis als relevant betrachten. Die Expert:innen differenzieren ihre Einschätzung auf Basis einer intervallskalierten Likert-Skala<sup>10</sup> in den Kategorien *nicht wichtig* (-2), *eher nicht wichtig* (-1), *neutral* (0), *eher wichtig* (1), *wichtig* (2) und *keine Angabe*. Hierzu wurde ein strukturierter Fragebogen verwendet (vgl. Anhang A.4) und insgesamt 41 Personen aus der Industrie befragt. Die Expert:innen bewerteten insgesamt 16 unterschiedliche Gestaltungselemente bezüglich der Relevanz für die praktische Umsetzung. Ergänzungen über ein Freifeld waren zusätzlich möglich.

### Ergebnisse – Allgemein

Abbildung 23 zeigt die Zusammensetzung der Unternehmen nach (a) Anzahl Mitarbeitende und (b) Jahresumsatz.

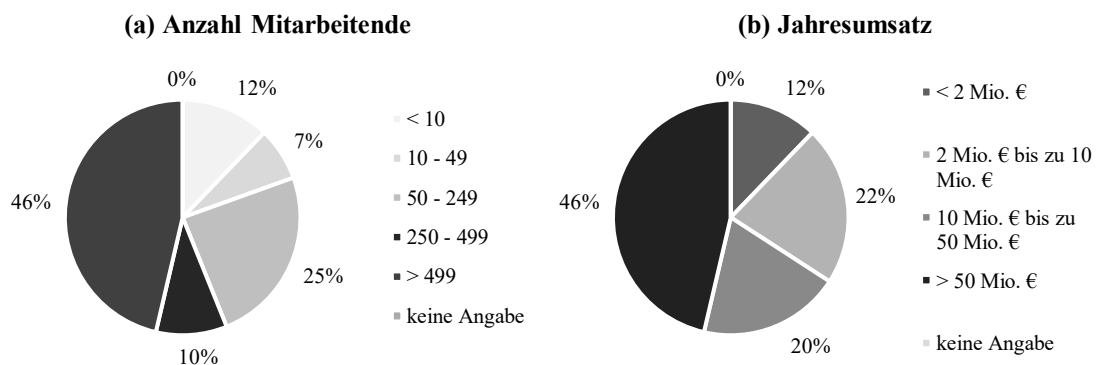


Abbildung 23: Empirische Analyse – Anzahl Mitarbeitende und Umsatzverteilung nach [FRIC22b]

44 % der Befragten repräsentieren Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitenden und fallen gemäß der EU-Definition somit in die Kategorie der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) [EURO23]. Die verbleibenden 56 % sind Vertreter:innen von Großunternehmen. Hinsichtlich des Jahresumsatzes zeigt sich eine vergleichbare Verteilung: 54 % erfüllen das KMU-Kriterium eines Jahresumsatzes von bis zu 50 Mio. € pro Jahr, während die restlichen 46 % den Schwellwert überschreiten.

<sup>10</sup> Eine Likert-Skala ist eine psychometrische Skala, welche aus mehreren Aussagen besteht, die alle dasselbe Merkmal messen und auf einer Ratingskala hinsichtlich des Zustimmungswertes evaluiert werden. In der Regel werden fünfstufige Skalen verwendet, wobei die Likert-Items unterschiedliche Intensitäten repräsentieren [DÖRI16].

Abbildung 24 zeigt die Branchenzugehörigkeit der befragten Unternehmen. Etwa 50 % der Unternehmen sind dem Maschinen- und Anlagenbau zuzuordnen, während weitere 12 % der Informations- und Kommunikationstechnologie-Branche angehören. 10 % der befragten Personen stammen aus dem Bereich des Business Service.

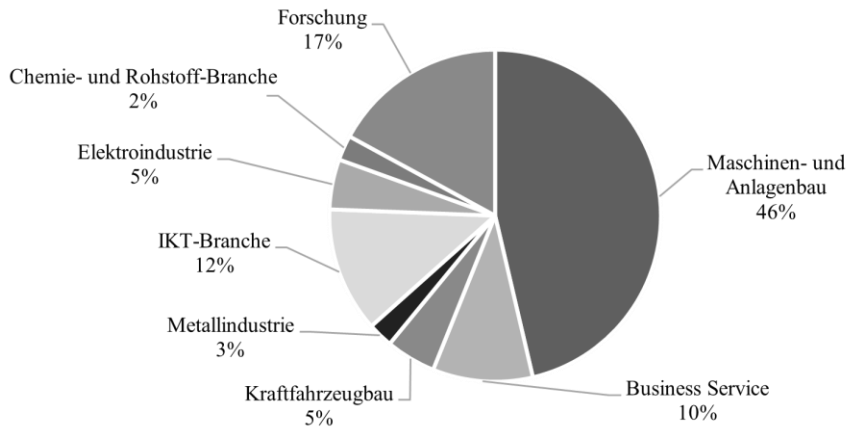


Abbildung 24: Empirische Analyse – Branchenzugehörigkeit nach [FRIC22b]

**Ergebnisse – Auswahl der Gestaltungselemente**

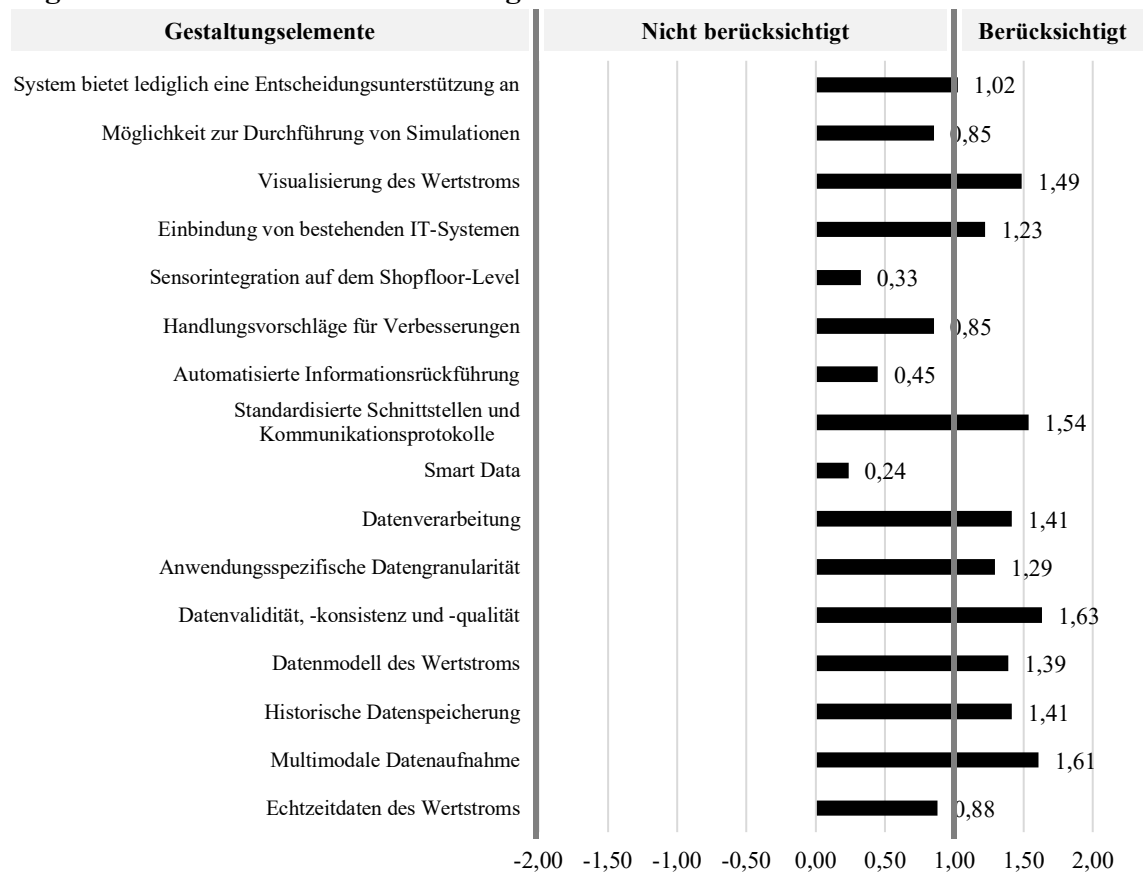


Abbildung 25: Ergebnisse der strukturierten Befragung (n=41) nach [FRIC22b]

Für die Arbeit werden ausschließlich die Gestaltungselemente berücksichtigt, die von den Expert:innen im Durchschnitt mindestens als „*eher wichtig*“ eingestuft wurden (Mittelwert  $\mu > 1,00$ ). Hiermit wird sichergestellt, dass nur die Gestaltungselemente in den Digitalen Zwilling eines Wertstroms integriert werden, die einen hohen Praxisbezug aufweisen. Auf diese Weise wurden sechs Gestaltungselemente nicht weiter berücksichtigt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Befragung ist in Abbildung 25 dargestellt. Die relevanten Gestaltungselemente werden im Folgenden in ein Gestaltungsmodell überführt (Abschnitt 5.2), bevor eine Ausgestaltung in Form von Gestaltungsprinzipien erfolgt (Abschnitt 5.3).

## 5.2 Konzeption des Gestaltungsmodells

Das Konzept des Gestaltungsmodells basiert sowohl auf den in Abschnitt 5.1.1 definierten inhaltlichen Anforderungen als auch auf den in Abschnitt 5.1.2 aus Sicht der Praxis ermittelten relevanten technischen Gestaltungselementen.

Die Grundstruktur des Modells basiert auf dem Konzept des Digitalen Zwillings (Abschnitt 2.4.1, Anforderung I7) und besteht aus den drei Dimensionen *physische Ebene*, *virtuelle Ebene* und der *Verbindungsebene*. Die Zuordnung der Gestaltungselemente zu den jeweiligen Gestaltungsdimensionen wird im Folgenden kurz vorgestellt, bevor die Elemente in Abschnitt 5.3 durch Gestaltungsprinzipien detailliert werden.

### Gestaltungsdimension 1: Physische Ebene

Ausgangspunkt des Digitalen Zwillings stellt der Betrachtungsgegenstand selbst, ein zuvor definierter *Wertstrom* von Rampe zu Rampe für eine ausgewählte Produktfamilie, dar (Abschnitt 5.3.1.1, Anforderung I9). Um eine zielgerichtete Entwicklung zu unterstützen, wird der *Anwendungsfall Wertstrommanagement* definiert, sodass der Datenbedarf für die weitere technische Umsetzung bestimmt werden kann (Abschnitt 5.3.1.2, Anforderungen I1-I6). Hieran anknüpfend wird die *Datenaufnahme* der relevanten Datenpunkte für den Anwendungsfall durch die *Einbindung bestehender IT-Systeme* und eine *multimodale Datenaufnahme* sichergestellt (Abschnitt 5.3.1.3, Anforderung I8).

### Gestaltungsdimension 2: Virtuelle Ebene

In der virtuellen Ebene bildet die *historische Datenspeicherung* den Ausgangspunkt. Durch die Speicherung können vergangene Zustände des Wertstroms rekonstruiert werden, was Rückschlüsse auf Fehlerursachen und die Wirksamkeit von Verbesserungsaktivitäten ermöglicht (Abschnitt 5.3.2.1, Anforderung I12). Die abschließende *Datenmodellierung* setzt verschiedene Datenpunkte miteinander in Beziehung, um eine einheitliche und standardisierte Basis für die anschließende Datenverarbeitung zu schaffen. Zudem erlaubt das Datenmodell die Zusammenführung von Daten aus verschiedenen Quellen (Abschnitt 5.3.2.2, Anforderung I13). Die *Datenverarbeitung* umfasst eine anwendungsfallspezifische Verarbeitung der Rohdaten sowie die Bereitstellung in der für den Anwendungsfall benötigten Granularität (Abschnitt 5.3.2.3, Anforderungen I1-I6).

### Gestaltungsdimension 3: Verbindungsebene

Die Verbindungsebene ermöglicht einen bidirektionalen Daten- bzw. Informationsaustausch zwischen der physischen und der virtuellen Ebene. Durch die Schnittstelle *Physisch/Virtuell* werden Daten, die während der Produktion erzeugt werden, in die virtuelle Ebene übertragen (Abschnitt 5.3.3.1, Anforderung I10). Die Schnittstelle *Virtuell/Physisch* gewährleistet, dass die im Rahmen der Datenverarbeitung erzeugten Informationen in die Produktion transferiert werden (Abschnitt 5.3.3.2, Anforderung I11). Hierbei wird auf die *Visualisierung des Wertstroms* in Form einer Wertstromkarte (Abschnitt 2.2.2.1) zurückgegriffen, welche die Daten für die *Entscheidungsunterstützung* im Wertstrommanagement zur Verfügung stellt. Eine zusammenfassende Darstellung der Struktur des Gestaltungsmodells und der Zuordnung der Gestaltungselemente zu den drei Gestaltungsdimensionen findet sich in Abbildung 26. Weiterhin findet sich die Zuordnung der inhaltlichen Anforderungen (vgl. Tabelle 12) ebenfalls in Abbildung 26.

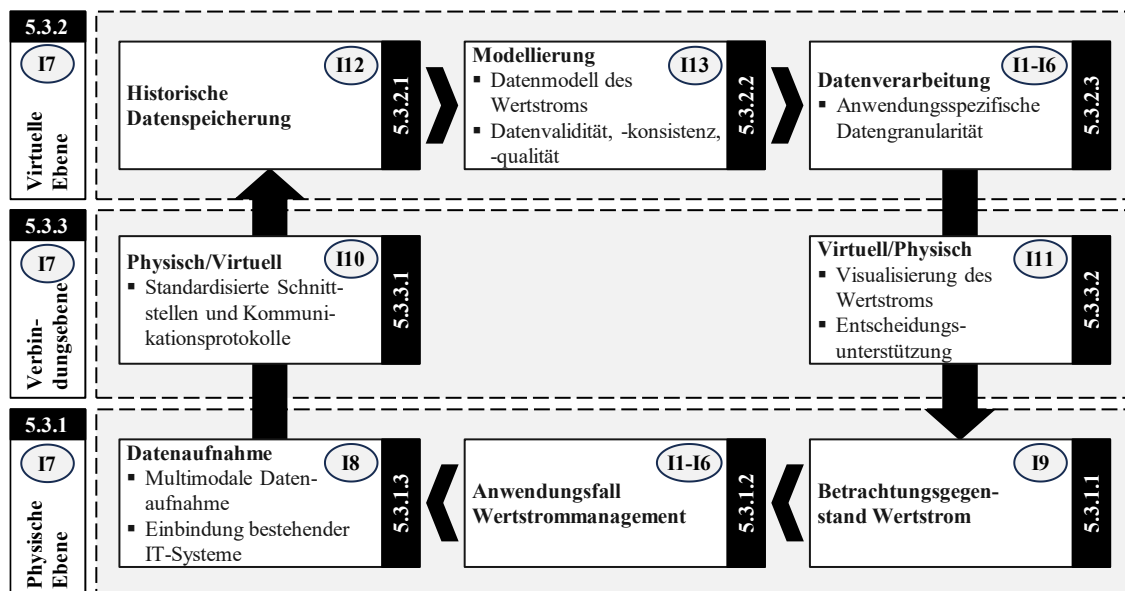


Abbildung 26: Struktur des Gestaltungsmodells

### 5.3 Detaillierung der Gestaltungselemente

Im Folgenden wird das entworfene Gestaltungsmodell umfassend erläutert. Hierbei werden für jede Gestaltungsdimension die entsprechenden Gestaltungselemente mithilfe von Gestaltungsprinzipien detailliert. Diese wurden zum einen systematisch aus der Literatur abgeleitet und zum anderen durch die Umsetzungserfahrung des Autors ergänzt.

#### 5.3.1 Gestaltungsdimension 1: Physische Ebene

Im Folgenden werden die drei Gestaltungselemente der physischen Ebene mithilfe von Gestaltungsprinzipien detailliert, um die Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings zu unterstützen.

### 5.3.1.1 Gestaltungselement 1.1: Wertstrom

Zentrales Element für die Umsetzung eines Digitalen Wertstromzwillings in der physischen Ebene stellt der Wertstrom als der zu digitalisierende Betrachtungsgegenstand dar. Um diesen eindeutig beschreiben zu können, sind drei Gestaltungsprinzipien zu beachten.

Gestaltungsprinzip 1.1.1: Die betrachtete Produktfamilie ist definiert.

Zur Reduktion der Komplexität eines Digitalen Wertstromzwillings empfiehlt es sich, den Fokus auf eine bestimmte *Produktfamilie* zu legen. Hierbei ist es notwendig, eine repräsentative Produktgruppe mit strategischer und ökonomischer Relevanz auszuwählen [DIN20]. Die hierdurch entstehende Segmentierung der Produktion ermöglicht eine transparente Gliederung ebenjener und erlaubt die Aufnahme eines Wertstroms je Produktfamilie [ROTH99]. Hierfür ist die Bildung der sog. Produktfamilienmatrix elementar. In dieser Matrix werden die Produktionsprozesse des Unternehmens in den Spalten aufgetragen, während die Produktvarianten, die derzeit hergestellt werden, in den Zeilen aufgeführt werden. Das „x“ symbolisiert, dass das Produkt der Zeile den in der Spalte genannten Prozess durchläuft (vgl. Abbildung 27).

Artikel-Nr.	Prozess A	Prozess B	Prozess C	Prozess D	Prozess E	
04G_07	x	x		x	x	PF 1
06G_03	x	x		x	x	
03G_01	x	x		x		
04S_02		x	x	x		
03S_09		x		x	x	PF 2
07S_01		x		x	x	
08S_05		x		x	x	

Abbildung 27: Produktfamilie Beispiel (Eigene Darstellung in Anlehnung an [ROTH99])

Das manuelle Aufstellen der Produktfamilienmatrix ist grundsätzlich möglich, jedoch bei einer hohen Produktvarianz mit einem hohen personellen Aufwand verbunden. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die gezielte Anwendung von Assoziations- und Clusteranalysen dazu beitragen kann, den Prozess der Produktfamilienbildung datenbasiert zu beschleunigen. [URNA23a, URNA23b]

Gestaltungsprinzip 1.1.2: Der Wertstrom ist eindeutig abgegrenzt.

Aufbauend auf der vorherigen Produktfamilienbildung kann die Produktion in Segmente unterteilt werden, für die anschließend separate Wertströme gestaltet werden. Die Segmentierung fördert die Transparenz im Unternehmen, da durch die *eindeutige Abgrenzung* erkennbar wird, welche Aktivitäten, Ressourcen, Informationen und Prozesse für die weitere Betrachtung relevant sind. Orientiert an der Definition von ROTHER UND SHOOK lassen sich einzelne Wertströme wie folgt voneinander abgrenzen:

„Der Wertstrom umfasst alle Aktivitäten, die notwendig sind, um ein Produkt vom Rohmaterial bis zum Kunden zu bringen.“ [ROTH99]

Darüber hinaus kann der Wertstrom nach HARTMANN in direkte und indirekte Bereiche unterteilt werden [HART21]:

- Der *direkte Bereich* umfasst alle Aktivitäten, bei denen die Herstellung des physischen Produktes im Fokus steht, insbesondere Fertigung, Montage und Logistik.
- Der *indirekte Bereich* umfasst die Aktivitäten der Auftragsabwicklung, die nicht Teil des direkten Bereiches sind.

Bei der Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings liegt der Schwerpunkt insbesondere auf dem direkten Bereich. Daher muss der Wertstrom im Hinblick auf den physischen Herstellungsprozess für die jeweilige Produktfamilie abgegrenzt werden.

### 5.3.1.2 Gestaltungselement 1.2: Anwendungsfall Wertstrommanagement

Wie in Kapitel 4 ermittelt, ist der digitale Unterstützungsbedarf je nach Anwendungsfall des Wertstrommanagements unterschiedlich. Um die zielgerichtete Ausgestaltung des Digitalen Zwillings zu unterstützen, wird zunächst der Anwendungsfall des Wertstrommanagements festgelegt.

Gestaltungsprinzip 1.2.1: Der Anwendungsfall für den Digitalen Zwilling im Wertstrommanagement ist bestimmt.

Basierend auf der Bestimmung des Anwendungsfalls kann der Datenbedarf für den Digitalen Wertstromzwilling in den kommenden Abschnitten definiert werden. Wie in Abschnitt 4.2 dargelegt, wird im Rahmen des Wertstrommanagements zwischen drei Planungshorizonten mit jeweils zwei Aufgaben differenziert. Die Fokussierung auf eine oder mehrere dieser Aufgaben ermöglicht, in Übereinstimmung mit der Abgrenzung des Wertstroms, eine präzise Bestimmung des erforderlichen Datenbedarfs für die praktische Anwendung (vgl. Abschnitt 4.3). Auf diese Weise werden die Rahmenbedingungen für die weitere Implementierung festgelegt. Im Anschluss an die Auswahl des Anwendungsfalls erfolgt die Bestimmung des zugehörigen Datenbedarfs. Hierzu sind drei Gestaltungsprinzipien zu beachten.

Gestaltungsprinzip 1.2.2: Die relevanten Daten werden aus dem Anwendungsfall abgeleitet und für jeden Prozessschritt des direkten Bereiches benannt.

Um den Datenbedarf aus dem Anwendungsfall abzuleiten, wird zur Strukturierung auf die sog. *Datenbedarfsmatrix* zurückgegriffen. Die Struktur der Matrix wird in Abbildung 28 dargestellt. Die erste Spalte repräsentiert die aus dem Anwendungsfall ermittelten Datenbedarfe. Die nachfolgenden Spalten repräsentieren die Prozesse und -verbindungen des ausgewählten Wertstroms. Für jede Zelle der Matrix wird angegeben, ob ein Datenbedarf für den zugehörigen Prozess oder -verbindung existiert. Hierbei

symbolisiert ein „x“, dass der Datenbedarf besteht und der zugehörige Datenpunkt bereits vorliegt. Ein „o“ hingegen symbolisiert, dass ein Datenbedarf besteht, dieser zum aktuellen Zeitpunkt allerdings noch durch keinen Datenpunkt abgedeckt wird.

Datenbedarf	Prozesse (P) und Prozessverbindungen (PV)					
	P A	PV A/B	P B	PV B/C	P C	...
ZZ	x		x		o	
RZ			o		x	
LZ		x		o		
OEE			o		x	
LG	x	x	x	o	o	
...						

Abbildung 28: Datenbedarfsmatrix (Eigene Darstellung in Anlehnung an [HART21])

### 5.3.1.3 Gestaltungselement 1.3: Datenaufnahme

Im Rahmen der Datenaufnahme wird zwischen zwei grundlegenden Herkünften der Datenpunkte differenziert – der Herkunft aus bestehenden IT-Systemen sowie der Herkunft aus einer multimodalen Datenaufnahme.

Gestaltungsprinzip 1.3.1: Die durch bestehende IT-Systeme erfassten Daten sind definiert und für jeden Datenpunkt der Speicherort eindeutig bestimmt.

Die in IT-Systemen vorliegenden Wertstromdaten werden in Stamm- und Bewegungsdaten unterschieden [URNA23b]. Unter Stammdaten werden *allgemeine Unternehmensdaten* verstanden, welche über einen längeren Zeitraum konstant sind und das Fundament für operative Informationssysteme darstellen [ISO22]. Sie werden in der Regel in ERP-Systemen gespeichert. Bewegungsdaten hingegen sind an einen spezifischen Zeitpunkt gebunden und unterliegen einer ständigen Veränderung. Hierzu zählen bspw. *Maschinen- oder Prozessdaten*, welche regelmäßig in Betriebsdatenerfassungs-Systemen (BDE) gespeichert werden. Weiterhin werden zeitlich veränderliche *Auftrags- und Personaldaten* in MES erfasst. [FELD19] Eine Übersicht über typische Datenarten in spezifischen produktionsnahen IT-Systemen bietet Abbildung 29. Je nach vorhandenen IT-Systemen in Unternehmen variiert diese Zuordnung.

Um die in IT-Systemen vorhandenen Datenpunkte zu strukturieren, wird eine Erweiterung der *Datenbedarfsmatrix* vorgenommen. Hierzu wird für jeden Prozessschritt dokumentiert, in welchem IT-System der spezifische Datenpunkt vorhanden ist („x“) oder ob er zukünftig in einem der bestehenden IT-Systeme abgespeichert werden soll („o“) (vgl. Abbildung 30).

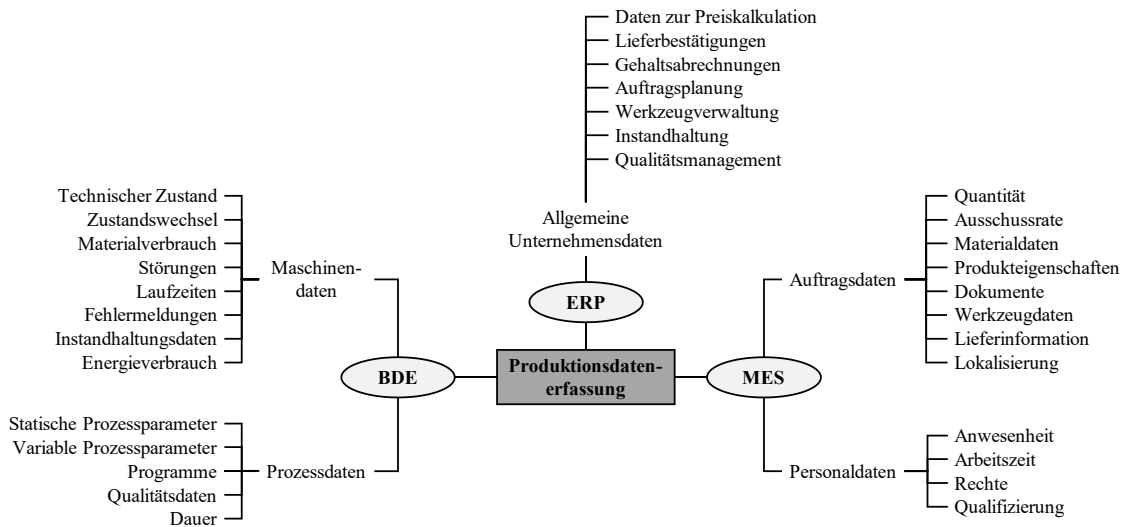


Abbildung 29: Überblick über typische Daten in IT-Systemen der Produktion (Eigene Darstellung in Anlehnung an [FELD19])

Gestaltungsprinzip 1.3.2: Die durch die multimodale Datenaufnahme erfassten Daten sind definiert und die Art der Erfassung für jeden Datenpunkt bestimmt.

Im Rahmen der Digitalisierung mit dem Zielbild der Industrie 4.0 sind in Unternehmen neben bestehenden IT-Systemen weitere Systeme und Methoden zur Datenaufnahme eingeführt worden, die zu einer Vielzahl weiterer Speichermedien geführt haben [METT22]. In diesem Kontext wird von einer *multimodalen Datenaufnahme* gesprochen, wenn Daten aus verschiedenen Quellen, Systemen oder Sensortypen gesammelt werden, um einen umfassenden Überblick über den Produktionsprozess zu erlangen. Dabei handelt es sich in der Regel um Industrie 4.0-Anwendungen für einen spezifischen Anwendungsfall – bspw. können in einem Qualitätsmanagement-System die Qualitätsdaten im Rahmen der Qualitätskontrolle gespeichert werden. Um die durch eine multimodale Datenaufnahme vorhandenen Datenpunkte zu strukturieren, wird die *Datenbedarfsmatrix* erneut erweitert. Hierzu wird für jeden Prozessschritt ergänzt, welche Daten im Rahmen der multimodalen Datenaufnahme bereits erfasst werden („x“) und welche durch zusätzliche Sensorik in Zukunft erfasst werden müssen („o“) (vgl. Abbildung 30). Nachdem der Datenbedarf sowohl auf Basis bestehender IT-Systeme als auch der multimodalen Datenaufnahme für jeden Prozessschritt und jede Prozessverbindung durchgeführt worden ist, wird im letzten Schritt der Handlungsbedarf für die jeweiligen Kennzahlen abgeleitet und in der Datenbedarfsmatrix gekennzeichnet. Die vollständige Datenbedarfsmatrix dient als Ausgangsbasis für die Detaillierung der virtuellen Ebene.



Datenbedarf	Prozess	IT-Systeme					Multimodale Datenaufnahme					Handlungsbedarf
	P B	ERP	MES	BDE	...	...	Excel	Auto-ID	...	...	...	
ZZ	x			x								<input checked="" type="checkbox"/>
RZ	o								o			<input checked="" type="checkbox"/>
LZ												<input checked="" type="checkbox"/>
OEE	o							o				<input checked="" type="checkbox"/>
LG	x	x										<input checked="" type="checkbox"/>
...												...

Abbildung 30: Erweiterte Datenbedarfsmatrix

### 5.3.2 Gestaltungsdimension 2: Virtuelle Ebene

Nachstehend werden die Gestaltungselemente der virtuellen Ebene zur Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings durch Gestaltungsprinzipien detailliert.

#### 5.3.2.1 Gestaltungselement 2.1: Historische Datenspeicherung

Das Gestaltungselement der Datenspeicherung wird durch drei Gestaltungsprinzipien beschrieben. Dabei werden sowohl die Abtastrate und Erfassungsart jedes einzelnen Datenpunktes im physischen Wertstrom definiert, der spezifische Speicherort als auch die Zeitstempel für jeden Datenpunkt bestimmt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Datenpunkte in der notwendigen Datengranularität vorliegen.

Gestaltungsprinzip 2.1.1: Die Abtastrate und Erfassungsart sind für jeden Datenpunkt definiert und auf das notwendige Minimum beschränkt.

Für die Datenspeicherung werden sowohl die Abtastrate als auch die Erfassungsart jedes Datenpunktes festgelegt und explizit auf das notwendige Minimum begrenzt. Die *Abtastrate*, mit der ein bestimmter Datenpunkt erfasst wird, wird so definiert, dass Ressourcen effizient genutzt und die Datenmengen gezielt reduziert werden. Hierbei unterscheiden UHLEMANN ET AL. zwischen volatilen und nicht volatilen Daten [UHLE17a]. In den Bereich der volatilen Daten fallen bspw. Maschinendaten, welche eine kontinuierliche, hochfrequente Abtastrate bedingen [STAN18]. Unter nicht volatilen Daten werden bspw. Prozessdaten verstanden, welche durch die Prozessverantwortlichen in einer definierten Frequenz erzeugt werden [HERS20].

Neben der Abtastrate ist für jeden Datenpunkt ebenso die *Erfassungsart* zu definieren. Hierbei kann nach METTERNICH ET AL. insbesondere zwischen einer automatisierten-, einer teilautomatisierten- oder einer manuellen Erfassung differenziert werden [METT22]. Bspw. können Energiesensoren oder eine digitale Objekterkennung durch ein Kamerasystem für die kontinuierlichen und automatisierten Aufnahme verwendet werden [HERS20]. Da die Auswahl der Abtastrate und der Erfassungsart maßgeblich durch den Anwendungsfall des Digitalen Wertstromzwillings bestimmt wird, ist eine abschließende Nennung nicht möglich. Die in Abbildung 31 aufgeführten Beispiele dienen daher

lediglich als Ausgangspunkt und können bei Bedarf um weitere Abtastraten oder Erfassungsarten erweitert werden.

Abtastrate	kontinuierlich	minütlich	stündlich	pro Schicht	täglich	Ereignisbasiert
Erfassungsart	automatisiert	teilautomatisiert	manuell		berechnet	

Abbildung 31: Abtastrate und Erfassungsfrequenz für die Datenspeicherung (Eigene Darstellung in Anlehnung an [METT22, HERS20])

**Gestaltungsprinzip 2.1.2: Der spezifische Speicherort ist für jeden Datenpunkt eindeutig benannt.**

Elementar für die anschließende Datenverarbeitung ist die eindeutige Zuordnung jedes Datenpunktes zu einem *spezifischen Speicherort*. Die Zuordnung ermöglicht eine effiziente Organisation der Daten und erleichtert den Zugriff auf die gespeicherten Informationen [METT22]. Während die zuvor aufgestellte Datenbedarfsmatrix insbesondere die Quelle jedes Datenpunktes adressiert, zum Beispiel ERP-System oder MES, zielt die Benennung des spezifischen Speicherortes innerhalb des IT-Systems darauf ab, eine präzise Rückverfolgung und Analyse des Ursprunges der Daten zu ermöglichen. Hierdurch werden bestehende Inkonsistenzen oder Verwechslungen zwischen verschiedenen Datenpunkten minimiert und die Transparenz der Datenherkunft erhöht.

**Gestaltungsprinzip 2.1.3: Jeder erfasste Datenpunkt ist mit einem eindeutigen Zeitstempel versehen.**

Um die Dynamik und Variabilität der Elemente eines Wertstroms analysieren zu können, ist es unabdingbar, dass jeder Datenpunkt mit einem *eindeutigen Zeitstempel* versehen wird. Diese Bedingung wird durch die Rückverfolgung einzelner Bauteile bzw. Aufträge sichergestellt und liegt in der Regel bereits in den vorhandenen IT-Systemen vor [LIND19]. Hierdurch wird ein sog. Event Log erzeugt [VAN 16]. Grundlegend beschreibt das Event Log einen Statuswechsel (Activity) für ein definiertes Objekt (Case ID) zu einem bestimmten Zeitpunkt (Startzeit, Endzeit) [URNA23b]. Ein beispielhafter Event Log findet sich in Tabelle 13.

Tabelle 13: Beispielhafter Event Log nach [FRIC24b]

Case ID	Activity	Startzeit	Endzeit
230721-01G-021	Montage	2023-07-18 11:25	2023-07-18 11:39
230718-06S-046	DLRA	2023-07-18 13:21	2023-07-18 13:27
230719-01S-018	DMG Mori 850V	2023-07-18 16:54	2023-07-18 17:07
230718-06S-046	Montage	2023-07-19 08:49	2023-07-19 08:56
230719-01S-018	DLRA	2023-07-19 14:05	2023-07-19 14:11
230721-01G-021	Haas Super MM1	2023-07-20 07:57	2023-07-20 08:05
230718-06S-046	Härteofen IVA RH 655	2023-07-20 08:32	2023-07-20 09:52
230721-01G-021	Reinigungsbecken	2023-07-20 10:26	2023-07-20 10:35
230718-05S-009	DMG Mori 850V	2023-07-20 15:03	2023-07-20 15:05
230718-05S-009	DLRA	2023-07-21 13:16	2023-07-21 13:25
230718-06S-046	Leitz PMM 864	2023-07-21 14:35	2023-07-21 14:36
...	...	...	...

Auf diese Weise wird eine eindeutige Chronologie der Ereignisse in einem Wertstrom gewährleistet und Trends und Entwicklungen in Produktionsprozessen können analysiert werden. Die Zeitstempel liefern darüber hinaus die Basis, um Daten aus verschiedenen Quellen zu synchronisieren.

### 5.3.2.2 Gestaltungselement 2.2: Modellierung

Die Datenmodellierung dient dazu, einen Ausschnitt der Realität in eine Form zu überführen, die anschließend in einer Datenbank abgebildet werden kann. Der Datenmodellierungsprozess erfordert die Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses zwischen allen involvierten Elementen entlang des Wertstroms. Zugleich werden die Beziehungen der Elemente dokumentiert, um eine kohärente Darstellung des Modells zu gewährleisten. [ELMA02] In der Praxis hat sich hierzu eine Vorgehensweise etabliert, welche den Ausschnitt der Realität mithilfe einer dreistufigen Modellierung mit zunehmendem Detaillierungsgrad und Datenbankbezug abbildet. Das stufenweise Vorgehen ermöglicht eine kontinuierliche Verfeinerung des Modells und eine präzise Repräsentation in einer Datenbank. Hierzu wird zunächst ein datenbankunabhängiges *konzeptionelles Datenmodell* erstellt, welches anschließend in ein *logisches Datenmodell* überführt wird. Abschließend wird das logische Datenmodell in die Datenbanksprache überführt und die Datenbank implementiert, welche als *physisches Datenmodell* bezeichnet wird (vgl. Abbildung 32). [HEUE02, GEIS11]

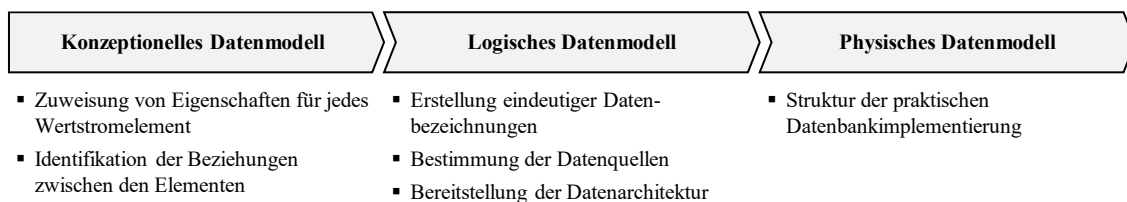


Abbildung 32: Phasen der Datenmodellierung (Eigene Darstellung in Anlehnung an [SHER23])

Im Folgenden werden die drei Phasen nacheinander vorgestellt und entsprechend auf die Darstellung eines Wertstroms adaptiert.

#### Konzeptionelles Datenmodell

Das konzeptionelle Datenmodell verfügt über den höchsten Abstraktionsgrad und dient der Darstellung der grundlegenden Entitäten und deren Beziehungen zueinander. Priorität haben dabei Einfachheit und Lesbarkeit, sodass es sowohl von Datenbankentwickler:innen als auch Endnutzer:innen gleichermaßen verstanden wird. [TEOR11] Details wie Datentypen oder physikalische Einheiten sind an dieser Stelle nicht relevant. Ebenso ist das konzeptionelle Datenmodell unabhängig von einer spezifischen Datenbank, sodass es keiner Entscheidung bzgl. eines Datenbanktyps an dieser Stelle bedarf. [GEIS11] Im

Folgenden werden die vier Gestaltungsprinzipien zur Umsetzung eines konzeptionellen Datenmodells detailliert.<sup>11</sup>

Gestaltungsprinzip 2.2.1: Die Entitäten und Entitätstypen des Wertstroms sind bekannt und eindeutig benannt.

Ein Wertstrom setzt sich aus verschiedenen Elementen, *Entitäten* genannt, zusammen, welche bereits in Abschnitt 2.2.2.1 erläutert wurden. Die wesentlichen Entitätstypen eines Wertstroms sind demnach die Folgenden: Kunde(n), Lieferant(en), Prozessschritte, Prozessverbindungen, Produkte/Produktfamilie und Material. Die Entitäten eines Wertstroms sind von der spezifischen Situation und der betrachteten Produktfamilie abhängig. Je nach Branche kann es daher weitere Elemente geben. Die oben genannten Entitäten stellen eine allgemeine Übersicht dar, die für die Produktion diskreter Güter typisch sind.

Gestaltungsprinzip 2.2.2: Die Beziehungen zwischen den Wertstromentitäten und -entitätstypen sind definiert.

Für die Modellierung des Wertstroms ist im nächsten Schritt die Definition der *Beziehungen* zwischen den in Gestaltungsprinzip 2.2.1 definierten Entitätstypen entscheidend. CHEN unterscheidet drei Arten von Beziehungen, auch *Kardinalitäten* genannt, die auf den jeweiligen Verbindungen positioniert werden. [CHEN77] Bei einer eindeutigen Zuordnung liegt eine 1:1-Kardinalität vor. Handelt es sich hingegen um eine „Viele-zu-Eins-Verknüpfung“, wird die N:1-Kardinalität verwendet. Liegt hingegen eine „Mehr-zu-Mehr-Verknüpfung“ vor, muss eine N:M-Kardinalität verwendet werden. [THRO11] Typische Beziehungen zwischen den Wertstrom-Entitätstypen werden nachstehend beschrieben.

Der Wertstrom selbst ist für mehrere *Produkte* einer Produktfamilie konzipiert. Ein *Wertstrom* kann aus mehreren *Prozessschritten* bestehen, welche wiederum Bedarf an mehreren *Materialien* besitzen. In einem Wertstrom existieren mehrere *Prozessverbindungen*, welche jedoch einzeln immer ausschließlich zwischen zwei *Prozessschritten* eine Verbindung herstellen können. Darüber hinaus existieren für einen Wertstrom in der Regel mehrere *Kunden*, welche durch ihr Bestellverhalten Einfluss auf den Wertstrom nehmen. Auf der anderen Seite wird ein Wertstrom von mehreren *Lieferanten* beliefert. Die skizzierten Beziehungen sind je nach Wertstrom unterschiedlich und müssen für jeden spezifischen Anwendungsfall neu bestimmt werden.

---

<sup>11</sup>Für die konzeptionelle Datenmodellierung haben sich in der Praxis zwei Diagrammtypen durchgesetzt. Das (Erweiterte-)Entity-Relationship-Modell (EER-Modell) nach CHEN oder das Unified Modeling Language (UML)-Klassendiagramm nach BOOCH ET AL. [CHEN77, BOOC04].

Gestaltungsprinzip 2.2.3: Die Entitätstypen sind durch Generalisierung und Spezialisierung unterteilt und zusammengefasst.

Die Begriffe *Generalisierung* und *Spezialisierung* beschreiben besondere Beziehungstypen zur Strukturierung großer Datenstrukturen. Sie ermöglichen die präzise Modellierung der Struktur von Datenbanken sowie die eindeutige Darstellung von Beziehungen zwischen den Entitätstypen. [JARO16] Im Rahmen der *Generalisierung* werden ähnliche Entitätstypen zu einem übergeordneten Entitätstypen zusammengefasst, welcher die gemeinsamen Merkmale und Eigenschaften der zusammengefassten Entitäten repräsentiert [BECK12]. Bspw. können in einem Wertstrom ähnliche Produktionsprozesse zu einem übergeordneten Entitätstypen, wie die spanende Fertigung, zusammengefasst werden, während die Montage einen unabhängigen Entitätstypen darstellt. Dies führt zu einer Verallgemeinerung der Entitätstypen. Im Gegensatz zur Generalisierung werden bei der *Spezialisierung* explizit einzelne Entitätstypen aus einem übergeordneten Entitätstypen abgeleitet, um spezifische Entitäten darzustellen, welche einmalige Eigenschaften besitzen [BECK12]. Dies führt zu einer detaillierteren Darstellung der Entitätstypen. Abbildung 33 zeigt an einem Beispiel, wie die Prozessschritte Fräsen, Drehen und Bohren zum allgemeinen Entitätstypen spanende Fertigung zusammengefasst werden können (Generalisierung), der Prozessschritt Sägen hingegen einer Spezialisierung bedarf, da dieser sich von den anderen Prozessschritten unterscheidet (vgl. Gestaltungsprinzip 2.2.4).

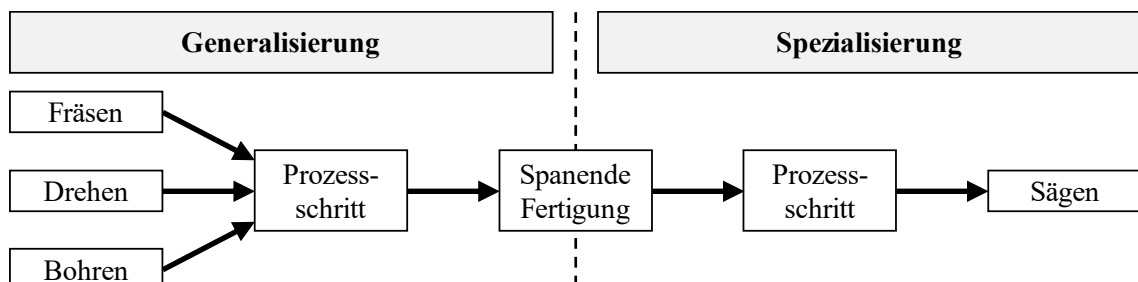


Abbildung 33: Generalisierung und Spezialisierung der Wertstromentitäten

Gestaltungsprinzip 2.2.4: Die relevanten Attribute der Entitäten sind systematisiert.

In einem Wertstrom umfassen die verschiedenen Entitäten spezifische Eigenschaften, welche für das Verständnis des Wertstroms von elementarer Bedeutung sind [GEIS11]. Durch die *Systematisierung* der Attribute werden die Informationen geordnet und können im weiteren Verlauf in einem strukturierten Datenmodell abgebildet werden. Auf diese Weise wird eine eindeutige und effiziente Modellierung des Wertstroms ermöglicht. Dabei helfen die Attribute, die Beziehungen und Abhängigkeiten einzelner Wertstromentitäten zu verstehen. [HEUE02, BECK12] In Abbildung 34 ist eine Erweiterung des vorherigen Beispiels vorgenommen. Dem generellen Entitätstyp spanende Fertigung sind exemplarische *Attribute* zugeordnet, welche gleichzeitig den untergeordneten Prozessschritten Fräsen, Drehen und Bohren vererbt werden. Der spezialisierte Entitätstyp Sägen hingegen enthält neben den Attributen der spanenden Fertigung zwei weitere spezifische

Attribute – die notwendige Qualifikation der Mitarbeitenden sowie den Sägeotyp. Das am Beispiel gezeigte Vorgehen ist auf alle Entitäten im jeweiligen Anwendungsfall zu übertragen, um eine schlanke und ressourcenschonende Datenbankstruktur implementieren zu können.

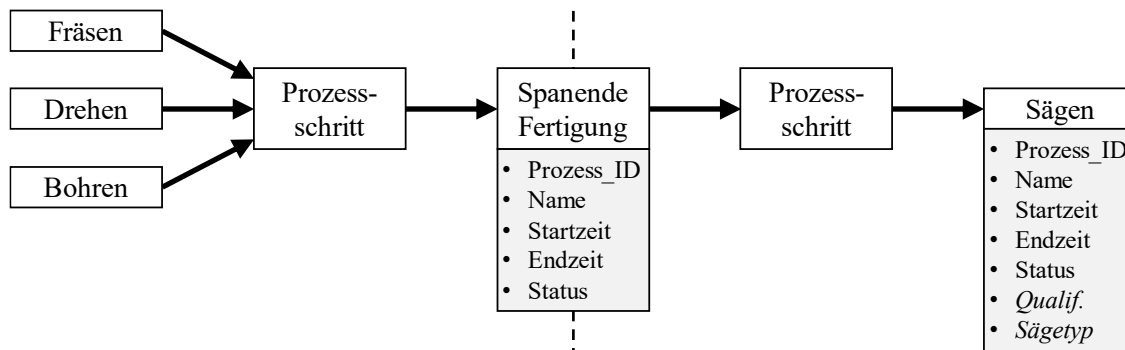


Abbildung 34: Systematisierung der Wertstromentitäten

Nachdem im konzeptionellen Datenmodell die relevanten Informationsobjektklassen und deren Beziehungen identifiziert und abstrakt dargestellt wurden, erfolgt im logischen Datenmodell die detaillierte Ausarbeitung der Entitäten, Attribute und Beziehungen des konzeptionellen Datenmodelles.

### Logisches Datenmodell

Die Transformation des konzeptionellen Datenmodells in ein physisches Datenmodell bedingt ein logisches Datenmodell als Zwischenstufe, in der die spezifischen Anforderungen des Datenbanktyps berücksichtigt werden. Die nachfolgenden vier Gestaltungsprinzipien unterstützen die praktische Umsetzung des logischen Datenmodells.

Gestaltungsprinzip 2.2.5: Die eindeutig identifizierenden Attribute sind als Primärschlüssel definiert.

*Primärschlüssel* sind spezielle Attribute, die eine eindeutige Identifikation von Datensätzen in einer Datenbank ermöglichen. Jeder Primärschlüssel muss einmalig sein und darf nicht mehrfach in der Datenbank vorkommen. Als eindeutige Identifikationsmerkmale ermöglichen Primärschlüssel die Unterscheidung zwischen einzelnen Datensätzen und tragen somit zur Datenintegrität bei. Bei der Festlegung der Primärschlüssel-Attribute gibt es mehrere Regeln zu beachten [BECK12, JARO16]:

1. **Eindeutigkeit:** Jeder Wert des Primärschlüssels darf nur einmal in der Datenbank vorkommen.
2. **Unveränderlichkeit:** Der Wert eines Primärschlüssels darf nicht verändert werden, da dies zu Dateninkonsistenz führt.
3. **Nicht-Null:** Der Wert eines Primärschlüssels darf nicht den Wert „Null“ annehmen, da ansonsten die Eindeutigkeit verloren gehen kann.

4. **Minimale Redundanz:** Um die Datenbankeffizienz zu gewährleisten, ist ein guter Primärschlüssel kurz und einfach. Numerische oder alphanumerische Werte helfen hierbei.

Im Wertstromkontext sind je nach Entitätstyp verschiedene Primärschlüssel denkbar. Bspw. ist für die Entität *Produkt* eine eindeutige *Produkt-ID*, die jedes Produkt im Wertstrom identifiziert, elementar, um die Rückverfolgbarkeit entlang des Wertstroms zu gewährleisten (vgl. *Case-ID* in Tabelle 13, Abschnitt 5.3.2.1).

Gestaltungsprinzip 2.2.6: Die weiteren Beziehungen werden durch Fremdschlüssel beschrieben.

*Fremdschlüssel* sind Attribute in einer Tabelle einer Datenbank, welche eine Beziehung zu einem Primärschlüssel einer anderen Tabelle ermöglichen. Auf diese Weise wird eine Verbindung zwischen den Daten der beiden Tabellen hergestellt [HEUE02]. Mithilfe der Verknüpfung durch Fremdschlüssel können komplexe Datenabfragen durchgeführt werden, welche Informationen aus mehreren Tabellen miteinander verbinden, die eine umfassende Sicht auf die Beziehungen zwischen den Daten in der Datenbank bieten (vgl. Abbildung 35). Das Beispiel zeigt eine Darstellung in Form eines Erweiterten-Entity-Relationship-Modells (EER-Modell) nach CHEN [CHEN77].

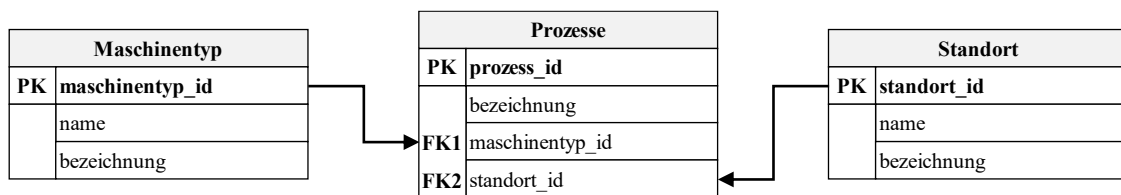


Abbildung 35: Verknüpfung Datenbanktabellen mit Fremdschlüsseln

Gestaltungsprinzip 2.2.7: Die Datentypen der Attribute sind festgelegt.

Für die weitere Konkretisierung des Datenmodells ist es elementar, jedem Attribut einen spezifischen *Datentyp* zuzuweisen. Dieser definiert den maximal möglichen Wertebereich der gespeicherten Informationen sowie die benötigte Speicherkapazität. Die Datentypen müssen daher zur Minimierung des Speicherplatzbedarfs so kompakt wie möglich gewählt werden, aber gleichzeitig eine ausreichende Genauigkeit sicherstellen, um die Auflösung der Daten so präzise wie möglich zu ermöglichen. [HEUE02, ELMA02, GEIS11] Im Anhang A.5 findet sich eine Auswahl an Datentypen zur Darstellung von *Zeichenketten*, *ganzen Zahlen*, *Gleitkommazahlen* und *Zeitstempel-Attributen* sowie eine Begründung für die Auswahl entsprechender Typen [KLIP23]. Da Datentypen nicht in der EER-Darstellung angegeben, sondern separat dokumentiert werden, wird die Datenbedarfsmatrix aus Abschnitt 5.3.1 um den Bereich *Datentyp* erweitert, in dem für jeden identifizierten Datenbedarf die Einheit sowie der Datentyp festgehalten werden (vgl. Abbildung 36).

Datenbedarf	Prozesse (P) und Prozessverbindungen (PV)						Datentyp	
	P A	PV A/B	P B	PV B/C	P C	...	Einheit	Typ
ZZ	x		x		o		s	float
RZ			o		x		min	float
LZ		x		o			h	float
OEE			o		x		%	float
LG	x	x	x	o	o		Stk.	integer
...								

Abbildung 36: Erweiterung der Datenbedarfsmatrix um die Kategorie Datentyp

Gestaltungsprinzip 2.2.8: Redundante Daten werden durch Normalisierung vermieden.

Um ein Datenmodell in einen optimalen Zustand zu überführen und Redundanzen im Modell zu vermeiden, wird eine *Normalisierung* des Datenmodells vorgenommen. Dies erfolgt in mehreren Schritten, die als Normalformen (NF) bezeichnet werden. Die am weitesten verbreiteten Normalformen sind die *erste-*, *zweite-* und *dritte Normalform* [HEUE02]. In Anhang A.6 finden sich Beispiele für die praktische Anwendung der drei Normalformen. Generell zielt die Normalisierung darauf ab, das Datenmodell in kleine und gut strukturierte Tabellen zu unterteilen, sodass Redundanzen vermieden und die Datenintegrität gewährleistet wird. Hierdurch wird eine verschwendungsarme Datenverwaltung bei kleinstmöglichem Speicherbedarf ermöglicht. Nachdem im logischen Datenmodell die identifizierenden Attribute als Primärschlüssel definiert sind, die weiteren Beziehungen mithilfe von Fremdschlüsseln beschrieben wurden, alle Datentypen der Attribute definiert sind und eine Normalisierung des Datenmodells stattgefunden hat, erfolgt im nächsten Schritt die Umwandlung in ein physisches Datenmodell.

### Physisches Datenmodell

Die Überführung des logischen in das physische Datenmodell stellt die Umsetzung des abstrakten Modells in eine explizite Datenbankstruktur dar. Drei Gestaltungsprinzipien unterstützen bei der Umsetzung.

Gestaltungsprinzip 2.2.9: Der Datenbanktyp ist ausgewählt und das entsprechende Datenbankmanagement-System ist installiert.

Wie in Gestaltungsprinzip 2.2.2 dargelegt, besteht ein Wertstrom aus unterschiedlichen Entitäten, die in Beziehung zueinander gebracht werden müssen. Um diese in einer Datenbank abzubilden, muss die Datenbank folgende Modellierungskriterien erfüllen:

- **Universalität:** Integration unterschiedlicher Daten, bspw. Zeitreihendaten oder konstanten Metadaten [PETR21b]
- **Skalierbarkeit:** Möglichkeit zum Hinzufügen weiterer Datenpunkte und Tabellen [UHLE17a]



- **Kompatibilität:** Unterstützung standardisierter Kommunikationsprotokolle, wie OPC UA oder MQTT [HÜBN18]
- **Latenz:** Geringe Verzögerung bei Lese- und Schreibvorgängen von Daten [ELLG18]
- **Übersichtlichkeit und Struktur:** Datenspeicherung mit systematischer Struktur und Beziehungen [ELLG18]

Anhang A.7 gibt einen Überblick über verschiedene *Datenbanktypen* sowie eine Einschätzung, welche Typen sich für die Darstellung eines Wertstroms in einer Datenbank eignen. Dabei ist die Entscheidung für einen Datenbanktypen von den spezifischen Anforderungen der Anwendungsfälle des Wertstrommanagements abhängig. Liegt der Fokus auf einer regelmäßigen Analyse statischer Daten im Rahmen der langfristigen Wertstromplanung, kann eine relationale Datenbank verwendet werden. Liegt der Fokus allerdings auf dem kontinuierlichen Monitoring des Wertstroms zur kurzfristigen Planung, ist eine Zeitreihendatenbank die bessere Wahl [PETR21b]. Um diesen Konflikt aufzulösen, gibt es ein hybrides Datenbankmanagement-System *TimescaleDB*, bei dem es sich um eine für Zeitreihendaten optimierte Erweiterung des relationalen Datenbankmanagement-Systems *PostgreSQL* handelt [TIME24a]. Fallen neben zeitabhängigen Datenreihen sowohl Meta-Daten als auch komplex voneinander abhängige Daten an, sollte für eine bessere Strukturierung auf ein derartiges hybrides Datenbankmanagement-System zurückgegriffen werden [SCHN20]. Ermöglicht wird dies durch die Nutzung sog. Hypertables, welche eine zeitliche Partitionierung der Zeitreihendaten mithilfe sog. Chunks vornehmen. Hierbei wird nach Ablauf einer vordefinierten Zeitspanne jeweils ein neuer Chunk erstellt, in den die Zeitreihendaten fortgeschrieben werden. Diese Partitionierung ermöglicht eine effiziente Datenverwaltung und beschleunigt den Zugriff auf die relevanten Zeitreihendaten, indem nicht die gesamte Tabelle, sondern lediglich der entsprechende Chunk durchsucht werden muss [TIME24b].

Gestaltungsprinzip 2.2.10: Das logische Datenmodell ist in die Datenbanksprache überführt.

Die Überführung des logischen Datenmodells in die Datenbanksprache ist ein individueller Prozess, der stark von dem gewählten Datenbanktyp abhängt. Dieser Schritt erfordert daher Kenntnisse in Datenbanktechnologien, da jede Datenbank ihre eigene Syntaxen und Regeln verwendet. Es wird daher empfohlen, Datenbankexpert:innen für die Implementierung hinzuzuziehen. Die Expert:innen sind dafür verantwortlich, das logische Modell mittels geeigneter Anweisungen in physische Datenstrukturen zu überführen. Diese Arbeit umfasst die Erstellung von Tabellen und die Integration der Daten, angepasst an den betrachteten Wertstrom. Eine Verallgemeinerung dieses Vorgehens ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, da die Details stark vom Einzelfall abhängen.

Gestaltungsprinzip 2.2.11: Die identifizierten IT-Systeme sowie die Systeme der multimodalen Datenaufnahme sind an die Datenbank angeschlossen.

Im letzten Schritt sind die identifizierten IT-Systeme sowie Systeme der multimodalen Datenaufnahme an die Datenbank anzuschließen. Hierzu ist in der Regel die Nutzung einer Middleware notwendig, welche die Kommunikation zwischen der Datenbank und dem IT-System ermöglicht. Da die praktische Umsetzung je nach IT-System, gewählter Middleware und physischen Datenmodell variiert, kann das Vorgehen an dieser Stelle nicht spezifiziert werden.

### 5.3.2.3 Gestaltungselement 2.3: Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung wird durch drei Gestaltungsprinzipien detailliert. Hierbei fokussiert sich das erste Gestaltungsprinzip auf die Datenbereinigung und -vorverarbeitung im Rahmen der Datenspeicherung. Auf diese Weise wird zunächst ein Datensatz geschaffen, der frei von Ausreißern ist und somit eine konsistente Datenbasis für die anschließende Datennutzung darstellt. Hierbei unterstützen die Gestaltungsprinzipien 2.3.2 und 2.3.3.

Gestaltungsprinzip 2.3.1: Die Datenbereinigung und -vorverarbeitung erfolgt anhand der fünf Dimensionen der Datenqualität.

Zur Bewertung der Datenqualität sind im Rahmen der Entscheidungsfindung *fünf Qualitätsdimensionen* definiert, welche es zu befolgen gilt [GÜNT19]:

1. Die **Genauigkeit** bewertet das Ausmaß, in dem Daten korrekt, zuverlässig und nachweislich fehlerfrei sind [WANG96].
2. Die **Vollständigkeit** berücksichtigt, ob ein Datensatz alle notwendigen Daten enthält, um den Zustand des betrachteten Objektes abbilden zu können [WAND96].
3. Die **Konsistenz** bezeichnet die Verletzung semantischer Regeln (Gestaltungsprinzipien 2.2.1-2.2.8), die für die Datenelemente definiert wurden [BATI09].
4. Die **Aktualität** wird durch die Volatilität des Systems, die Aktualisierungsfrequenz und den Zeitpunkt der Datennutzung beeinflusst und gilt als Referenz für die Aussagekraft der Informationen [WANG96, WAND96].
5. Die **Relevanz** bewertet, ob die verfügbaren Datentypen den Anforderungen der geplanten Nutzung genügen [WAND96].

Eine Überprüfung der Einhaltung der Qualität in diesen Dimensionen sollte bereits im Rahmen des Aufbaus des wertstromspezifischen Datenmodells erfolgen und stellt anschließend einen iterativen Prozess dar.

Gestaltungsprinzip 2.3.2: Die deskriptive Datenexploration und -analyse wird verwendet, um ein tiefergehendes Verständnis der Daten zu gewinnen.

Die deskriptive Datenexploration und -analyse verwendet statistische und grafische Techniken, um Daten zu beschreiben und zusammenzufassen. Ziel ist es, die Struktur und

Hauptmerkmale der Daten zu verstehen, ohne eine tiefere Ursachenanalyse zu betreiben. [DEUT95] Hierfür können einfache statistische Maße wie Mittelwert, Median, Modus oder Standardabweichung herangezogen werden, um die Homogenität der Daten zu analysieren. Insbesondere der Vergleich zwischen Mittelwert und Median bietet sich an, um den Einfluss von Ausreißern auf die Datenqualität identifizieren zu können. [FAHR16] Im Rahmen der Datenexploration erfolgt eine qualitative Analyse der Daten, sodass Anomalien, Muster oder Besonderheiten erkannt werden. Eine Visualisierung mithilfe von Boxplots oder Histogrammen erleichtert die Analyse und das Erkennen von Trends. [CLEV20] Abbildung 37 zeigt ein Beispiel der deskriptiven Datenanalyse (links) bzw. -exploration (rechts). Hierbei werden u.a. Ausreißer in den Zykluszeiten (links) auf Basis der maximalen Zykluszeit erkennbar, sowie Schwankungen in den Verteilungen einzelner Varianten eines Montageschrittes (rechts).

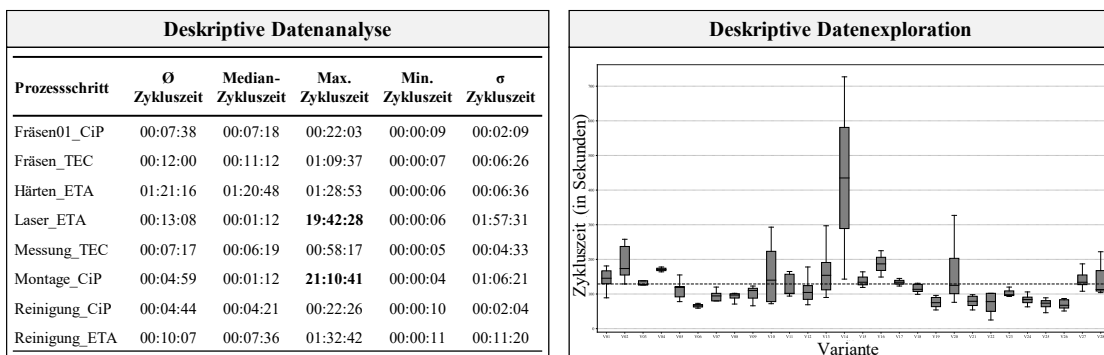


Abbildung 37: Beispielhafte deskriptive Datenanalyse und -exploration nach [FRIC24b]

Gestaltungsprinzip 2.3.3: Das Erkennen von Veränderungen, Saisonalitäten oder zyklischen Mustern erfolgt mittels Zeitreihenanalyse.

Liegen historische Datenpunkte über einen längeren Zeitpunkt vor, hilft eine *Zeitreihenanalyse*, inhärente Muster in den Daten zu erkennen [LUST10]. Für produzierende Unternehmen stellt dies eine essenzielle Ressource dar, um Produktionsprozesse zu verbessern und den Wertstrom dynamisch an externen Schwankungen und interner Variabilität auszurichten. Hierbei können mehrere Muster unterschieden werden:

- *Temporäre Veränderungen*, z. B. durch die Implementierung einer neuen Technologie, die eine Reduktion der Zykluszeit zur Folge hat oder einen kurzfristigen Qualitätsverlust bedingt.
- *Saisonalitäten*, z. B. durch jahreszeitenbedingte Schwankungen des Kundenbedarfes, die eine Anpassung der Produktionskapazitäten bedingen.
- *Zyklische Muster*, z. B. durch personalbedingte Schwankungen der Bearbeitungszeiten innerhalb eines Prozessschrittes.

Insbesondere bei zeitlich sequenzierten Daten nimmt die Datenbereinigung und -vorverarbeitung eine zentrale Rolle ein (vgl. Gestaltungsprinzip 2.3.1). Die Berücksichtigung der fünf Dimensionen der Datenqualität gewährleistet, dass Ausreißer präzise identifiziert

und aus dem Datensatz eliminiert werden, um die Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen. Abbildung 38 zeigt, wie die Eliminierung eines solchen Ausreißers im zeitlichen Verlauf dazu beiträgt, den restlichen Datensatz besser interpretierbar zu machen und ihn so im Zeitverlauf systematisch auf Muster analysieren zu können.

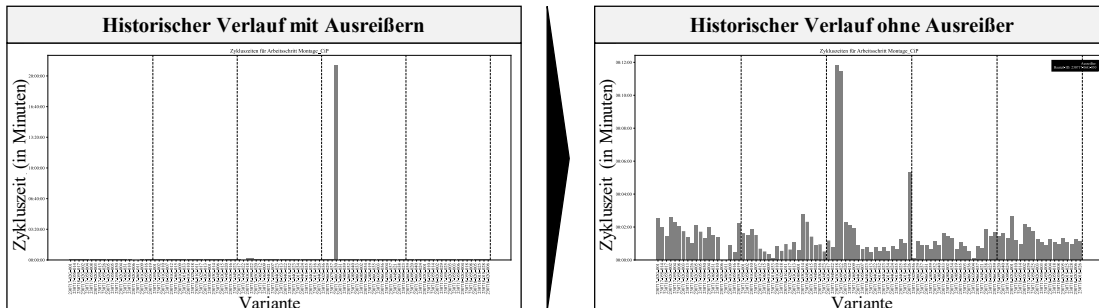


Abbildung 38: Beispielhafte Zeitreihenanalyse nach [FRIC24b]

### 5.3.3 Gestaltungsdimension 3: Verbindungsebene

Nachstehend werden die Gestaltungselemente der Verbindungsebene zur Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings durch Gestaltungsprinzipien detailliert.

#### 5.3.3.1 Gestaltungselement 3.1: Physisch/Virtuell

In der Schnittstelle zwischen physischer und virtueller Ebene sind zwei Gestaltungsprinzipien zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 39), die im Folgenden detailliert werden.

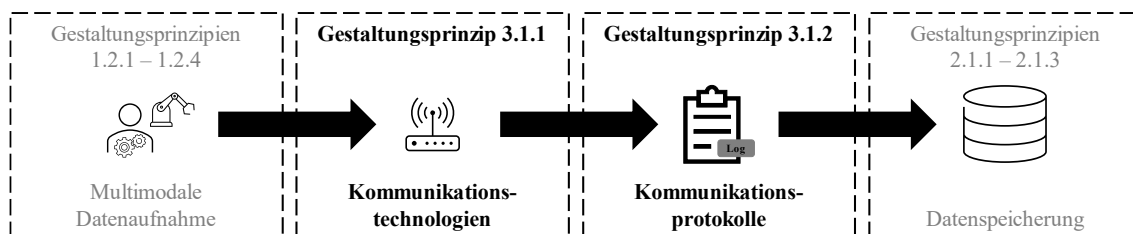


Abbildung 39: Zusammenhang Gestaltungsprinzipien Schnittstelle Physisch/Virtuell

Gestaltungsprinzip 3.1.1: Die Auswahl der Kommunikationstechnologien erfolgt anwendungsspezifisch anhand ihrer technischen Eigenschaften.

Um die Datenpunkte aus der multimodalen Datenaufnahme (Gestaltungsprinzip 1.3.2) historisieren zu können (Gestaltungsprinzip 2.1.1-2.1.3) ist die Auswahl einer geeigneten Kommunikationstechnologie unabdingbar. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologien sind in der Wissenschaft bereits umfangreich diskutiert und von FLEISCHER ET AL. in einem Werkzeugkasten zusammengefasst (vgl. Abbildung 40) [FLEI18]. Dieser wurde an ausgewählten Stellen um zusätzliche Informationen ergänzt, sofern eine Weiterentwicklung der Technologie stattgefunden hat [BABE21, LANG21a].

	Topologie	Max. Reichweite	Übertragungsgeschwindigkeit	Zykluszeit	Fehlererkennung	Bemerkungen
<b>Industrial Ethernet</b>	Linie, Ring Stern	Ca. 500 m	100 Mbit/s bis 10 Gbit/s [BABE21]	Bis < 1 millisecc	32 Bit CRC	Leistungsfähiges Komm.system
<b>Sercos III</b>	Ring, Linie	Ca. 500 m	100 Mbit/s	31,25 microsec bis 65 millisecc	CRC-Check	Weiterentwicklung von Sercos
<b>Profibus-DP</b>	Linie	Bis 1200 m	Bis 12 MBaud	6 millisecc	Paritätsprüfung und Blockcheck	Breiter Anwendungsbereich
<b>Interbus</b>	Ring	12,8 km	Bis 16 Mbit/s	< 4 millisecc	16 Bit CRC	Feldbus für ind. Automation
<b>CAN-Bus</b>	Linie	Bis 1 km	1 MBaud	160 microsec	15 Bit CRC	Schneller Bus
<b>AS-Interface</b>	Linie, Baum	100 m	167 kbit/s	5-10 millisecc	Paritätsbit, Mehrfachabtastung	Komm. von dezentralen Sensoren
<b>IO-Link</b>	Punkt-zu-Punkt	Max. 20 m	4,8 kBaud bis 230,4 kBaud	2 millisecc	Robuste Komm. mit 24V-Pegel	Standard für Sensoranbindung
<b>RS232</b>	Punkt-zu-Punkt	Bis 900 m	Bis zu 19,2 kBaud	n.a.	Paritätsbit	Erdunsymmetrische Schnittstelle
<b>RS485</b>	Mehrpunktverbidung	Bis 1200 m	93,75 kBaud	n.a.	Paritätsbit möglich	Einfach und oft kostengünstig
<b>Analog (20 mA)</b>	Zweipunktverbidung	Max. 1000 m	9,6 kBaud	n.a.	Paritätsbit	Analogsignal durch Stromstärke
<b>WLAN</b>	Infrastrukturnetz oder Ad-hoc-Netz	Bis 50 m [LANG21b]	433-1202 Mbit/s [BABE21]	n.a.	Barker Code	Drahtlose Datenübertragung
<b>Bluetooth</b>	Ad-hoc-Netz	1-10 m [LANG21b]	Bis zu 3 Mbit/s	625 microsec (min.)	Forward Error Correction	Drahtlose Datenübertragung

Abbildung 40: Werkzeugkasten Kommunikationstechnologien nach [FLEI18]

Gestaltungsprinzip 3.1.2: Für jeden Datenpunkt wird ein standardisiertes Kommunikationsprotokoll verwendet.

Für die Übertragung von Daten aus der physischen in die virtuelle Ebene ist die Auswahl der Kommunikationsprotokolle elementar. Für die Auswahl können sechs für die industrielle Anwendung relevante Kriterien herangezogen werden:

Ein Kommunikationsprotokoll soll die *Interoperabilität* zwischen Geräten, Maschinen und Systemen sicherstellen. Hierbei wird zwischen der *semantischen* und *syntaktischen Interoperabilität* differenziert [OUKS99]. Erstere bezieht sich auf die Fähigkeit von Systemen, Informationen auf eine konsistente Weise auszutauschen und zu interpretieren. Zweitere bezieht sich auf die konforme Syntax oder das Datenformat, das in der Interaktion zwischen Systemen und Anwendungen genutzt wird. Eine homogene Struktur ist hierbei unabdingbar [PETR21a, SILV21, AL-M20]. Neben der Interoperabilität ist *Sicherheit* für Industrie 4.0-Technologien ein wichtiges Entscheidungskriterium. Daher muss der gewählte Kommunikationsstandard etablierte Sicherheitsmechanismen wie Verschlüsselung, Authentifizierung und Zugriffsprotokolle unterstützen, um die Datenintegrität zu gewährleisten [SILV21, GERO23, TIGH20]. Darüber hinaus ist die *Skalierbarkeit* elementar, um mit der wachsenden Anzahl von Geräten und Datenverkehr umgehen zu können [AL-M20, LADE22, PETR21a]. Abhängig vom Anwendungsbereich werden unterschiedliche Anforderungen an die *Geschwindigkeit und Latenz* der Datenübertragung gestellt. Hierbei können Echtzeitanforderungen eine Rolle spielen, welche

die Wahl des Kommunikationsprotokolls beeinflussen [SILV21, AL-M20, BAYI22]. Um die reibungslose Datenübertragung zu garantieren, sollte die *Integration mit bestehenden IT-Systemen* problemlos möglich sein [BABE23, TIGH20, SILV21]. Zu guter Letzt müssen die *Kosten* für die Implementierung und den Betrieb des Kommunikationsstandards im Hinblick auf eine wirtschaftlich sinnvolle Lösung beachtet werden [PETR21a, BAYI22]. Anhang A.9 bietet eine Klassifikation gängiger Kommunikationsprotokolle, wie OPC UA oder MQTT, hinsichtlich der vorgestellten Kriterien und dient als Hilfestellung bei der Auswahl des richtigen Kommunikationsprotokolls.

### 5.3.3.2 Gestaltungselement 3.2: Virtuell/Physisch

Der Informationsrückfluss von der virtuellen in die physische Ebene gewährleistet die Funktionalität des Digitalen Wertstromzwillings. Zur Unterstützung dieser Schnittstelle wurden zwei Gestaltungsprinzipien erarbeitet, die bei der Konzeption und Auswahl einer adäquaten Softwarelösung für den Informationsrückfluss heranzuziehen sind.

Gestaltungsprinzip 3.2.1: Die Spezifikation und systematische Gewichtung der Anforderungen gewährleisten die zielgerichtete Auswahl der Visualisierungssoftware.

Die zielgerichtete Auswahl einer Softwarelösung bedingt die sorgfältige *Spezifikation von Softwareanforderungen*. Hierbei werden im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit Softwareanforderungen grundsätzlich in die Kategorien *funktionale Anforderungen*, *nicht-funktionale Anforderungen* und *organisatorische Randbedingungen* unterteilt [PART10, EBER14]. Nach Definition der Anforderungen steht im Ergebnis eine ungewichtete Liste, welche anhand ihrer Relevanz gewichtet werden muss. Eine *systematische Gewichtung* ist somit ein zentraler Schlüsselprozess im Rahmen der Auswahl. Auf diese Weise wird die Eignung potenzieller Softwarelösungen für den Anwendungsfall sichergestellt. Hierzu wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Paarvergleich genutzt. Dabei werden jeweils zwei Kriterien miteinander verglichen, um die Relevanz des einen gegenüber dem anderen zu bestimmen. Um die Objektivität der Bewertung sicherzustellen, wird der Paarvergleich durch unterschiedliche Stakeholder, einschließlich Nutzer:innen und Entwickler:innen der Softwarelösung, durchgeführt. Dies ermöglicht, wie in Tabelle 14 exemplarisch dargestellt, eine objektive Gewichtung der Anforderungen.

Tabelle 14: Beispielhafte Ergebnisse des Paarvergleichs und Gewichtung der Anforderungen

Bewertungskriterium	Person 1	Person 2	Person 3	Person 4	Ø-Wert	Gewichtung
Datenanbindung	20	19	14	13	16,5	12,48 %
Integration IT-Systeme	20	20	11	12	15,75	11,91 %
Wertstromdarstellung	20	20	15	13	17	12,85 %
Kosten	6	1	8	12	6,75	5,10 %
...	...	...	...	...	...	...
Summe					132,25	100 %

Gestaltungsprinzip 3.2.2: Die Analyse und Bewertung bestehender Softwarelösungen führt zur Selektion der am besten geeigneten Softwarelösung.

Im Anschluss an die Gewichtung der Anforderungen werden am Markt bestehende potenzielle Softwarelösungen identifiziert. Hierzu wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine umfangreiche *Analyse bestehender Softwarelösungen* für die Eignung zur Nutzung im Rahmen des Wertstrommanagements durchgeführt. Eine detaillierte Übersicht zu der Analyse kann in Anhang A.8<sup>12</sup> eingesehen werden. Diese Tabelle kann als Ausgangspunkt für die weitere Auswahl genutzt werden. Eigene Recherchen sollten hierzu dennoch durchgeführt werden, um die Aktualität der Tabelle zu gewährleisten.

Zur *Bewertung* der verfügbaren Informationen werden in Anlehnung an eine Nutzwertanalyse die Teilnutzenwerte der einzelnen Anforderungen je identifizierter Softwarelösung bestimmt und in eine quantitative Bewertung überführt [LUFT16]. Hierzu gibt es verschiedene Verfahren, mit denen eine Skalenunterteilung der Teilnutzenwerte vorgenommen werden kann [KERS14]. Ist eine *Quantifizierung* der spezifischen Anforderung, wie bspw. bei den Kosten einer Softwarelösung, möglich, eignet sich die Unterteilung in mehrere Intervalle, welche wiederum mit Teilnutzenwerten beziffert werden können. Darüber hinaus existieren *binäre Bewertungen*, in denen ein Kriterium entweder erfüllt sein kann oder nicht. Dementsprechend wird der Teilnutzen mit zwei Werten beziffert. Ein weiteres Verfahren setzt auf ein *minimal zu erreichendes Ziel*. Bei Erreichung der Minimalanforderung wird das Kriterium mit einem positiven Teilnutzenwert belegt, der sich bei höherer Zielerreichung steigert. [KERS14] Auf diese Weise wird die objektive Bewertung und Auswahl der Softwarelösung gewährleistet. Eine Verallgemeinerung ist aufgrund der Diversität der Softwarelösungen nicht realisierbar.

## 5.4 Zwischenfazit

*Die Entwicklung des Gestaltungsmodells* adressiert das **zweite Forschungsziel** und orientiert sich, in Analogie zur Grundstruktur des Digitalen Zwillinges, an den drei Gestaltungsdimensionen *physische, virtuelle* und *Verbindungsebene*. Die inhaltlichen Anforderungen präzisieren dabei die Grundstruktur des Gestaltungsmodells (Abschnitt 5.1.1). Innerhalb einer strukturierten Befragung wurden diese in potenzielle Gestaltungselemente umgewandelt und hinsichtlich ihrer Relevanz für die industrielle Praxis evaluiert. Hierbei wurden zehn Gestaltungselemente als relevant identifiziert (Abschnitt 5.1.2). Im Anschluss erfolgte die Konzeption des Gestaltungsmodells durch die Zuordnung der Gestaltungselemente zu den entsprechenden Gestaltungsdimensionen (Abschnitt 5.2). Um die Anwendung der Gestaltungselemente in der industriellen Praxis zu ermöglichen, werden diese mithilfe von Gestaltungsprinzipien detailliert (Abschnitt 5.3). Eine konsolidierte Darstellung der entwickelten Gestaltungsprinzipien findet sich in Tabelle 15.

---

<sup>12</sup> Die Analyse bestehender Softwarelösungen im Kontext der Wertstromdarstellung erfolgte im Zeitraum November 2023 bis Februar 2024.

Tabelle 15: Dokumentation der Gestaltungsprinzipien

<b>Gestaltungsdimension 1: Physische Ebene</b>		
1.1	Betrachtungsgegenstand Wertstrom	
1.1.1	Die betrachtete Produktfamilie ist definiert.	
1.1.2	Der Wertstrom ist eindeutig abgegrenzt.	
1.2	Anwendungsfall Wertstrommanagement	
1.2.1	Der Anwendungsfall für den Digitalen Zwilling im Wertstrommanagement ist bestimmt.	
1.2.2	Die relevanten Daten werden aus dem Anwendungsfall abgeleitet und für jeden Prozessschritt des direkten Bereiches benannt.	
1.3	Datenaufnahme	
1.3.1	Die durch bestehende IT-Systeme erfassten Daten sind definiert und für jeden Datenpunkt die Herkunft eindeutig bestimmt.	
1.3.2	Die durch die multimodale Datenaufnahme erfassten Daten sind definiert und die Art der Erfassung für jeden Datenpunkt bestimmt.	
<b>Gestaltungsdimension 2: Virtuelle Ebene</b>		
2.1	Historische Datenspeicherung	
2.1.1	Die Abstrakte und Erfassungsart sind für jeden Datenpunkt definiert und auf das notwendige Minimum beschränkt.	
2.1.2	Der spezifische Speicherort ist für jeden Datenpunkt eindeutig benannt.	
2.1.3	Jeder erfasste Datenpunkt ist mit einem eindeutigen Zeitstempel versehen.	
2.2	Datenmodellierung	
2.2.1	Die Entitäten und Entitätstypen des Wertstroms sind bekannt und eindeutig benannt.	Konzeptionelles DM
2.2.2	Die Beziehungen zwischen den Wertstromentitäten und -entitätstypen sind definiert.	
2.2.3	Die Entitätstypen sind durch Generalisierung und Spezialisierung unterteilt und zusammengefasst.	
2.2.4	Die relevanten Attribute der Entitäten sind systematisiert.	
2.2.5	Die eindeutig identifizierenden Attribute sind als Primärschlüssel definiert.	Logisches DM
2.2.6	Die weiteren Beziehungen werden durch Fremdschlüssel beschrieben.	
2.2.7	Die Datentypen der Attribute sind festgelegt.	
2.2.8	Redundante Daten werden durch eine Normalisierung vermieden.	
2.2.9	Der Datenbanktyp ist ausgewählt und das entsprechende Datenbankmanagement-System installiert.	Physisches DM
2.2.10	Das logische Datenmodell ist in die Datenbanksprache überführt.	
2.2.11	Die identifizierten IT-Systeme sowie die Systeme der multimodalen Datenaufnahme sind an die Datenbank angeschlossen.	
2.3	Datenverarbeitung	
2.3.1	Die Datenbereinigung und -vorverarbeitung erfolgt anhand der fünf Dimensionen der Datenqualität.	
2.3.2	Die deskriptive Datenexploration und -analyse wird verwendet, um ein tiefergehendes Verständnis der Daten zu gewinnen.	
2.3.3	Das Erkennen von Veränderungen, Saisonalitäten oder zyklischen Mustern erfolgt mittels Zeitreihenanalyse.	
<b>Gestaltungsdimension 3: Verbindungsebene</b>		
3.1	Schnittstelle physisch/virtuell	
3.1.1	Die Auswahl der Kommunikationstechnologien erfolgt anwendungsspezifisch anhand ihrer technischen Eigenschaften.	
3.1.2	Für jeden Datenpunkt wird ein standardisiertes Kommunikationsprotokoll verwendet.	
3.2	Schnittstelle virtuell/physisch	
3.2.1	Die Spezifikation und systematische Gewichtung der Anforderungen gewährleisten die zielgerichtete Auswahl der Visualisierungssoftware.	
3.2.2	Die Analyse und Bewertung bestehender Softwarelösungen führt zur Selektion der am besten geeigneten Softwarelösung.	

Um die Potenziale des Gestaltungsmodells vollständig erfassen zu können und eine Unterstützung für die Implementierung in der industriellen Praxis zu bieten, bedarf es einer Methode zur Operationalisierung des Gestaltungsmodells. Die Entwicklung einer unterstützenden Methode stellt demnach das dritte Teilziel der vorliegenden Forschungsarbeit dar und wird im folgenden Kapitel adressiert.



## 6 KONZEPTION UND DETAILLIERUNG DER METHODE

In diesem Kapitel findet die Konzeption und Detaillierung der Methode zur Anwendung des entwickelten Gestaltungsmodells (vgl. Kapitel 1) in der industriellen Praxis statt. Zunächst erfolgt die Konzeption der Methodenstruktur (Abschnitt 6.1). Auf dieser Basis wird in den Abschnitten 6.2 und 6.3 die Detaillierung der Methodenbausteine vollzogen, um das Kapitel mit einem Fazit (Abschnitt 6.4) abzuschließen. Die nachfolgenden Ausführungen sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitet und in [FRIC24d] bereits veröffentlicht.

### 6.1 Konzeption der Methodenstruktur

Um die Handhabbarkeit und Anwendbarkeit des Gestaltungsmodells zu unterstützen, werden vier Methodenbausteine definiert. Diese orientieren sich an den *drei Kernelementen des Digitalen Zwillings*: der physischen Ebene, der virtuellen Ebene und der Verbindungsebene (vgl. Abschnitt 2.4.1 und Anforderung I7) und sind um den vierten Baustein zur *Unterstützung der Anwendung im Wertstrommanagement* ergänzt. Ziel der Methodenbausteine ist es, die in Abschnitt 5.3 detaillierten Gestaltungselemente inklusive ihrer -prinzipien in eine logische und operative Reihenfolge für die Anwendung in der industriellen Praxis zu bringen. Hierbei werden die drei Ebenen sequenziell nacheinander durchlaufen (vgl. Abbildung 41).

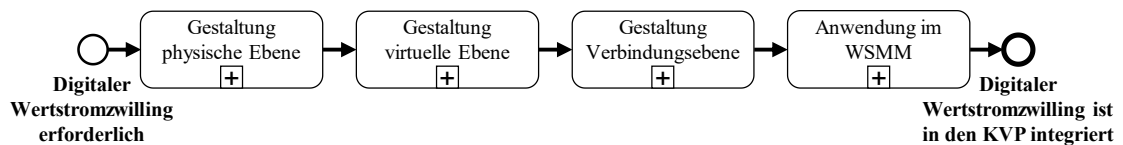


Abbildung 41: Konzeption der Methodenstruktur

Für die Visualisierung wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Notation *Business Process Model and Notation* (BPMN) gewählt. Diese erfährt laut GADATSCH in der Praxis eine weite Verbreitung und weist im Vergleich zu anderen Modellierungssprachen einen hohen Standardisierungsgrad auf [GADA12]. Im ersten Methodenbaustein, der *Gestaltung der physischen Ebene*, werden die Rahmenbedingungen festgelegt. Es erfolgt die Auswahl des zu betrachtenden Wertstroms sowie des spezifischen Anwendungsfalls im Wertstrommanagement. Auf dieser Basis wird ein erster Entwurf der notwendigen Datenbedarfe für den Digitalen Zwilling konzipiert. Der zweite Methodenbaustein, die *Gestaltung der virtuellen Ebene*, knüpft an die Definition der Rahmenbedingungen an und befasst sich mit dem Entwurf und der Implementierung des Digitalen Zwillings. In dieser Phase wird insbesondere die Modellierung des Datenzusammenhanges fokussiert und in Form eines konzeptionellen Datenmodells die Basis gelegt. Dieses wird in ein physisches Datenmodell transferiert, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Wechselwirkungen zwischen den Elementen des Wertstroms gelegt wird. Der dritte Methodenbaustein, die

*Gestaltung der Verbindungsebene*, beinhaltet die Einführung der Datenverarbeitung sowie des Informationsrückflusses von der virtuellen in die physische Ebene. Die abschließende *Anwendung im Wertstrommanagement* stellt den Informationsrückfluss aus der virtuellen in die physische Ebene sicher und sorgt für eine zielgerichtete Verbesserung des ausgewählten Wertstroms. Im Folgenden werden die Inhalte der jeweiligen Methodenbausteine näher erläutert.

### **Methodenbaustein 1 – Gestaltung physische Ebene**

Im Zuge des ersten Methodenbausteins werden zunächst die grundlegenden Rahmenbedingungen festgelegt. Dies beinhaltet die *Auswahl des zu betrachtenden Wertstroms* (Anforderung I9) und die *Beschränkung des Datenbedarfs auf die Anwendungsfälle des Wertstrommanagements* (Anforderungen I2-I6). Hierzu umfasst der erste Schritt die Definition des Wertstroms hinsichtlich der relevanten Produktfamilie und die Festlegung der Systemgrenzen. Im zweiten Schritt wird basierend auf den Anwendungsfällen des Wertstrommanagements (vgl. Abschnitt 4.2) der erforderliche Datenbedarf für die ausgewählten Anwendungsfälle abgeleitet. Der abschließende Schritt beinhaltet den Abgleich der benötigten Daten mit den bereits für den Wertstrom existierenden Datenpunkten. Hierbei werden sowohl bestehende IT-Systeme als auch ergänzende Datenaufnahmen analysiert und die bestehenden Lücken in der Datenaufnahme identifiziert.

### **Methodenbaustein 2 – Gestaltung virtuelle Ebene**

Aufbauend auf dem ersten Methodenbaustein wird im Rahmen der Gestaltung der virtuellen Ebene der Fokus auf die praktische Implementierung des Digitalen Zwillinges für den ausgewählten Wertstrom gelegt. Hierbei wird zunächst eine *Datenspeicherung der Rohdaten vorgesehen* (Anforderung I12). Erst wenn die Schnittstelle physisch/virtuell und die historische Datenspeicherung erfolgreich implementiert worden sind, wird mit der Datenmodellierung fortgefahren. Hierzu sieht der Methodenbaustein ein *Vorgehen zur Modellierung der Zusammenhänge* (Anforderung I13) vor. Dabei wird zunächst ein konzeptionelles Datenmodell entwickelt, welches die Zusammenhänge innerhalb des betrachteten Wertstroms definiert. Dieses wird daraufhin in ein logisches Datenmodell überführt, welches wiederum als Implementierungsgrundlage für das physische Datenmodell dient. Im Zuge der Implementierung des physischen Datenmodells wird die *standardisierte Datenübertragung in die virtuelle Ebene* (Anforderung I10), sprich in das physische Datenmodell, sichergestellt.

### **Methodenbaustein 3 – Gestaltung Verbindungsebene**

Die Gestaltung der Verbindungsebene, als dritter Methodenbaustein, stellt den *Daten- und Informationsrückfluss in die physische Ebene* (Anforderung I11) sicher. Hierzu muss der Digitale Zwilling die *Daten für das Wertstrommanagement in geeigneter Form bereitstellen* (Anforderung I1). Dies beinhaltet zunächst eine Datenverarbeitung, bei der die Datenqualität anhand von fünf Dimensionen überprüft wird. Sofern die bereitgestellten Daten die geforderte Qualität nicht erfüllen, erfolgt ein Rückgang in die virtuelle Ebene. In diesem Fall werden sowohl das physische Datenmodell als auch die Datenverarbeitung

so lange angepasst, bis die geforderten Daten erzeugt werden. Im Anschluss werden die Daten über eine Visualisierungsoberfläche für das Wertstrommanagement aggregiert bereitgestellt. Die Auswahl adäquater Softwarelösungen stellt einen integralen Bestandteil der Methode dar und gewährleistet den Informationsrückfluss aus der virtuellen in die physische Ebene. Zu Beginn erfolgt die systematische Definition und Gewichtung der Anforderungen. Erst nach Erstellung eines gewichteten Anforderungskatalogs kann die Identifikation geeigneter Softwarelösungen erfolgen. Nach erfolgter Auswahl wird die ausgewählte Softwarelösung an das physische Datenmodell angebunden, sodass die abschließende Visualisierung der Kennzahlen möglich ist.

Die Methodenbausteine 1-3 konzentrieren sich auf die initiale technische Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings. Erst nach erfolgreicher Implementierung des dritten Methodenbausteins wird der vierte Methodenbaustein durchgeführt, der die Anwendung des Digitalen Wertstromzwillings im Rahmen des Wertstrommanagements beschreibt.

#### **Methodenbaustein 4 – Anwendung im Wertstrommanagement**

Hierzu besteht der letzte Methodenbaustein aus vier Schritten. Zunächst erfolgt die regelmäßige *Analyse und Bewertung* der logistischen Leistung des Wertstroms, indem der zu erreichende Soll-Zustand mit der aktuellen Leistung verglichen wird. Werden in diesem Schritt Abweichungen festgestellt, wird im Rahmen der *Entscheidungsfindung* im Team eine Maßnahme definiert, um den Soll-Zustand zu erreichen. Im Nachgang erfolgt die *Implementierung der Verbesserungsmaßnahmen* im Wertstrom. Das *Monitoring der Anpassungen* stellt den Implementierungserfolg sicher. Auf diese Weise und durch den regelmäßigen Einsatz des Digitalen Wertstromzwillings wird sichergestellt, dass ebenjener in den kontinuierlichen Verbesserungsprozess integriert wird und der Weg zum Zielzustand unterstützt wird.

Im Folgenden wird zunächst die technische Implementierung mithilfe der in Kapitel 1 erläuterten Gestaltungselemente und -prinzipien detailliert und für die praktische Anwendung aufbereitet (Abschnitt 6.2). Im Anschluss wird die Anwendung im Wertstrommanagement detailliert (Abschnitt 6.3)

### **6.2 Methodenbausteine 1-3: Technische Implementierung**

Im Folgenden wird das Vorgehen zur initialen technischen Implementierung erläutert. Dabei wird auf die Inhalte der Gestaltungsprinzipien sowie die Umsetzungserfahrung des Autors zurückgegriffen. Zur Unterstützung des Verständnisses wird in Abbildung 42 die Gesamtdarstellung der Methodenschritte 1-3 gezeigt, um die Interdependenzen zwischen den Methodenbausteinen sichtbar zu machen und die Orientierung zu stärken.

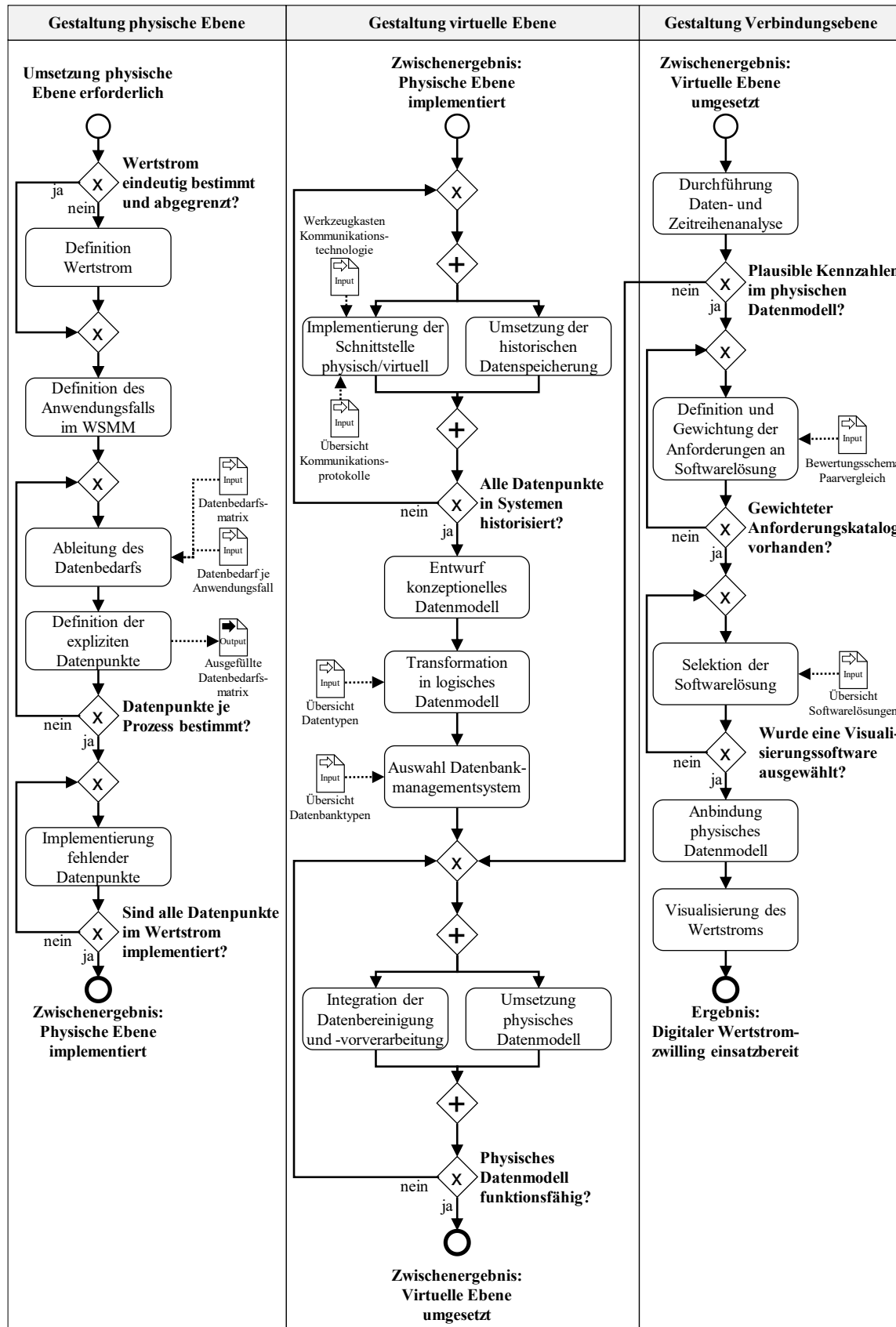


Abbildung 42: Gesamtübersicht Methodenschritte 1-3

### 6.2.1 Methodenbaustein 1: Gestaltung physische Ebene

Methodenbaustein 1, die Gestaltung der physischen Ebene, konzentriert sich auf die Definition der Rahmenbedingungen sowie die Befähigung des ausgewählten Wertstroms zur Datenerzeugung. Der Methodenbaustein unterteilt sich hierzu in fünf sequenzielle Schritte, welche im Folgenden erläutert werden.

#### **Methodenschritt 1.1: Definition des Wertstroms**

Die zentrale Zielstellung bei der Definition des Wertstroms ist die eindeutige Bestimmung und Abgrenzung innerhalb des Unternehmens, um eine detaillierte Analyse und zielgerichtete Verbesserung zu ermöglichen. Hierzu erfolgt im Methodenschritt 1.1 zunächst die *Definition der zu betrachtenden Produktfamilie*, die sowohl strategische als auch ökonomische Relevanz für das Unternehmen besitzt (vgl. Abschnitt 5.3.1.1). Neben der Auswahl der Produktfamilie ist die *eindeutige Abgrenzung* des Wertstroms essenziell, um die zu betrachtenden Prozessschritte im weiteren Verlauf zu bestimmen. In der Regel konzentriert sich die Abgrenzung des Wertstroms auf den direkten Bereich, in dem die physische Herstellung des Produktes erfolgt. Die Festlegung der Betrachtungsgrenzen ist notwendig, um Transparenz zu schaffen und den Fokus auf die relevanten Aktivitäten, Ressourcen und Prozessschritte zu richten.

#### **Methodenschritt 1.2: Definition des Anwendungsfalls im Wertstrommanagement**

Anknüpfend an die Definition des Wertstroms, konzentriert sich Methodenschritt 1.2 auf die *Definition eines spezifischen Anwendungsfalls* im Wertstrommanagement. Dies bildet die Grundlage für eine zielgerichtete Datenerhebung und die Anwendbarkeit des Digitalen Wertstromzwillings. Dieser Schritt ist entscheidend, da die unterschiedlichen Anwendungsfälle diverse digitale Unterstützungs- und Datenbedarfe bedingen (vgl. Abschnitt 4.2). Zur Definition des Anwendungsfalls unterstützen folgende Leitfragen:

- *Werden kurz-, mittel- oder langfristige Ziele fokussiert?*
- *Welcher Anwendungsfall des Wertstrommanagements wird für die Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings betrachtet?*

Die Auswahl muss dabei strategische Relevanz für das Unternehmen besitzen und eine klare Verbindung zu den Unternehmenszielen aufweisen. Basierend auf dem Anwendungsfall ergibt sich der notwendige Datenbedarf. Die Fokussierung auf die Aufgaben ermöglicht es, in Einklang mit der bereits erfolgten Abgrenzung des Wertstroms, die notwendigen Datenpunkte für die digitale Abbildung des Wertstroms und für die darauf aufbauende Anwendung des Digitalen Zwillings zu bestimmen.

#### **Methodenschritt 1.3: Ableitung des Datenbedarfs**

Methodenschritt 1.3 adressiert die *Bestimmung der notwendigen Datenpunkte* für die digitale Abbildung des Wertstroms auf Basis des gewählten Anwendungsfalls. Hierfür wird eine Datenbedarfsmatrix als Instrument verwendet, um eine strukturierte und umfassende

Erfassung der Datenpunkte zu gewährleisten. Zur Unterstützung bei der Ausfüllung der Datenbedarfsmatrix dienen die folgenden Leitfragen (vgl. Abbildung 43):

1. Welche Prozessschritte und Prozessverbindungen liegen im Wertstrom vor und müssen im weiteren Verlauf betrachtet werden?
2. Welcher Datenbedarf entsteht aus dem definierten Anwendungsfall?
3. Welche Datenpunkte müssen an den jeweiligen Prozessschritten implementiert werden, um ein vollständiges digitales Abbild des Wertstroms zu gewährleisten?

Das Diagramm zeigt die Struktur der Datenbedarfsmatrix. Ein horizontaler Pfeil oben rechts ist mit 'Leitfrage 1' beschriftet. Ein vertikaler Pfeil links unten ist mit 'Leitfrage 2' beschriftet. Ein diagonaler Pfeil, der von oben links nach unten rechts verläuft, ist mit 'Leitfrage 3' beschriftet.

Datenbedarf	Prozesse (P) und Prozessverbindungen (PV)					
	P A	PV A/B	P B	PV B/C	P C	...
ZZ			x		o	
RZ			o		x	
LZ		x		o		
OEE			o		x	
LG	x	x	x	o		
...						

Abbildung 43: Methodenschritt 1.3 – Aufbau Datenbedarfsmatrix

Der in Methodenschritt 1.1 definierte Wertstrom liefert hierbei die zu betrachtenden Prozesse und -verbindungen, während der für den gewählten Anwendungsfall relevante Datenbedarf mithilfe der Zuordnung der Aufgaben zu den Datenbedarfen des Wertstrommanagements (vgl. Tabelle 11 und Abbildung 13) hergestellt wird. Die abschließende Analyse der notwendigen Nachrüstungen erfolgt vor Ort. Hierbei dient die Datenbedarfsmatrix als visuelles Werkzeug, das alle notwendigen Datenpunkte entlang der einzelnen Prozesse und -verbindungen des Wertstroms auflistet. Die Anwendung dieser Matrix ermöglicht die Identifikation vorhandener und fehlender Datenpunkte, wodurch die Grundlage für die anschließende Definition der expliziten Datenpunkte geschaffen wird.

#### Methodenschritt 1.4: Definition der expliziten Datenpunkte

Zentrales Ziel des Methodenschrittes 1.4 ist die *Definition der expliziten Datenpunkte* für jeden Prozessschritt und -verbindung, um eine vollständige digitale Nachverfolgbarkeit entlang des Wertstroms zu ermöglichen. Hierbei wird zwischen zwei grundlegenden Herkünften der Datenpunkte differenziert – der Herkunft aus *bestehenden IT-Systemen* sowie der Herkunft aus einer *multimodalen Datenaufnahme*. Typische in IT-Systemen vorhandene Daten in produzierenden Unternehmen sind in Abschnitt 5.3.1.3 dokumentiert und unterstützen bei der Identifikation vorhandener Datenpunkte. Als Ergebnis dieses Schrittes liegt die ausgefüllte Datenbedarfsmatrix vor. In ebenjener sind die vorhandenen Datenpunkte je Prozessschritt und -verbindung dokumentiert sowie die fehlenden Datenpunkte, welche im weiteren Verlauf implementiert werden müssen. Um die Datenbedarfsmatrix zu erweitern und zu vervollständigen, werden die folgenden Leitfragen unterstützend herangezogen (vgl. Abbildung 44):

1. Welcher Prozessschritt oder -verbindung wird betrachtet?
2. Bestehende IT-Systeme:
  - a. Welche IT-Systeme existieren an diesem Prozessschritt oder dieser -verbindung?
  - b. Welcher Datenpunkt wird in welchem IT-System gespeichert?
3. Multimodale Datenaufnahme:
  - a. Welche Technologien werden für die zusätzliche Datenerfassung benötigt?
  - b. Welche Datenpunkte werden mithilfe welcher Technologie erfasst?

Datenbedarf	Prozess P B	Leitfrage 2.a IT-Systeme					Leitfrage 3.a Multimodale Datenaufnahme					Handlungsbedarf
		ERP	MES	BDE								
ZZ	x			x								<input checked="" type="checkbox"/>
RZ	o								o			<input checked="" type="checkbox"/>
LZ												<input checked="" type="checkbox"/>
OEE	o								o			<input checked="" type="checkbox"/>
LG	x	x										<input checked="" type="checkbox"/>
...												...

Abbildung 44: Methodenschritt 1.4 – Ausfüllung Datenbedarfsmatrix

Die ausgefüllte Datenbedarfsmatrix veranschaulicht, welche Datenpunkte vorhanden sind und welche Datenpunkte zur Vervollständigung des digitalen Abbilds des Wertstroms implementiert werden müssen. Auf diese Weise liefert sie Handlungsbedarfe für jeden Prozessschritt und jede -verbindung, die im nächsten Schritt umgesetzt werden.

**Methodenschritt 1.5: Implementierung der fehlenden Datenpunkte**

Der Fokus des letzten Methodenschrittes 1.5 des ersten Methodenbausteins liegt auf der *Implementierung der fehlenden Datenpunkte*. Die Implementierung schafft die physischen Voraussetzungen für eine kontinuierliche Datenerfassung und anschließende Anwendung im Wertstrommanagement. Da die praktische Implementierung jedes Mal individuell für den Prozessschritt und die -verbindung erfolgt und auf Fachpersonal zurückgegriffen werden muss, wird dieser Methodenschritt an dieser Stelle nicht weiter detailliert.

Als Zwischenergebnis ist festzustellen, dass die physische Ebene implementiert ist. Damit stehen alle notwendigen Datenpunkte zur Verfügung und der Wertstrom ist bereit für eine durchgängige Datenerfassung und -auswertung. Dieser Zustand bildet die Grundlage für die Gestaltung der virtuellen Ebene, die in den nachfolgenden Phasen der Methode betrachtet wird.

## 6.2.2 Methodenbaustein 2: Gestaltung virtuelle Ebene

Methodenbaustein 2, die Gestaltung der virtuellen Ebene, konzentriert sich auf die Implementierung des virtuellen Objektes des ausgewählten Wertstroms. Der Methodenbaustein unterteilt sich hierzu in sieben Schritte, welche im Folgenden erläutert werden.

### **Methodenschritt 2.1: Implementierung der Schnittstelle physisch/virtuell**

Methodenschritt 2.1 fokussiert die *Implementierung der Schnittstelle physisch/virtuell*, um eine robuste Verbindung zwischen der physischen Produktionsumgebung und dem virtuellen Objekt sicherzustellen. Hierfür wird der *Werkzeugkasten Kommunikationstechnologie* (vgl. Abbildung 40) genutzt, welcher die Vor- und Nachteile etablierter Kommunikationstechnologien im industriellen Umfeld zusammenfasst. Um eine Entscheidung bezüglich der Kommunikationstechnologie treffen zu können, unterstützen die folgenden Leitfragen:

- *Welche Kommunikationstechnologien sind im Unternehmen bereits etabliert?*
- *Erfüllen diese Technologien die notwendigen Anforderungen für den Datenpunkt oder muss eine andere Technologie verwendet werden?*

Neben der Auswahl der Kommunikationstechnologie ist die Auswahl eines Kommunikationsprotokolls essenziell. Die *Übersicht der Kommunikationsprotokolle* (vgl. Tabelle 25) und die folgenden Leitfragen unterstützen bei der Auswahl des geeigneten Protokolls:

- *Welche Abstrakte und Erfassungsart sind für jeden Datenpunkt erforderlich, um die Mindestanforderungen aus dem Wertstrommanagement zu erfüllen?*
- *Wie kann sichergestellt werden, dass jeder Datenpunkt einer eindeutigen Speicherposition zugeordnet ist?*

Da diese Fragestellungen eng mit der zukünftigen Datenspeicherung verknüpft sind, werden die Methodenschritte 2.1 und 2.2 parallel ausgeführt, um die Funktionsfähigkeit der Schnittstelle physisch/virtuell sicherzustellen.

### **Methodenschritt 2.2: Umsetzung der historischen Datenspeicherung**

Das Ziel ist es, die *Umsetzung der historischen Datenspeicherung* für den ausgewählten Wertstrom zu gewährleisten, sodass eine langfristige Datenanalyse und -rückverfolgung ermöglicht wird. Um dieses Ziel zu erreichen, sind für jeden Datenpunkt *eindeutige Zeitstempel* erforderlich, sodass die Integrität der Daten sichergestellt ist. Neben eindeutigen Zeitstempeln für jeden Datenpunkt ist die Zuordnung ebenjener zu den hergestellten Bauteilen elementar. Diese Anforderung wird durch die Rückverfolgung einzelner Bauteile oder Aufträge sichergestellt (siehe Abschnitt 5.3.2.1). Grundsätzlich sind unterschiedliche Verfolgungsebenen im Rahmen der Rückverfolgung entlang eines Wertstroms realisierbar. Dabei kann die *Verfolgungsgranularität* variieren, indem zwischen der Verfolgung einzelner Produktionsaufträge, Transporteinheiten, Losen oder individuellen Bauteilen unterschieden wird. Zudem spielt die *Erfassungsdichte* eine elementare Rolle



für zukünftige Datenanalysen. Wird das Verfolgungsobjekt lediglich am Start- oder Endpunkt je Prozessschritt erfasst, ist die Datenerfassung weniger detailliert als bei einer Erfassung am Start- und Endzeitpunkt jedes Prozessschrittes. Im Allgemeinen gilt: Je detaillierter die Datenaufnahme ist, desto umfangreicher sind die möglichen Datenanalysen. [SCHR24] Abbildung 45 verdeutlicht die möglichen Ausprägungen der Rückverfolgung.

<b>Verfolgungsgranularität</b>	Auftrag	Transporteinheit	Los	Individuelle Bauteile
<b>Erfassungsdichte</b>	Am Startpunkt je Prozessschritt	Am Endpunkt je Prozessschritt	Am Start- und Endpunkt je Prozessschritt	

Abbildung 45: Methodenschritt 2.2 – Rückverfolgung entlang des Wertstroms

Hierdurch wird eine eindeutige Chronologie der Ereignisse im Wertstrom gewährleistet und Trends in Produktionsprozessen können analysiert werden. Um eine eindeutige Bauteilverfolgung sicherzustellen, müssen folgende Leitfragen beantwortet werden:

- *Welche Verfolgungsgranularität ist für die Ermittlung der relevanten Kennzahlen am betrachteten Prozessschritt notwendig und realisierbar?*
- *Welche Erfassungsdichte muss am betrachteten Prozessschritt gewählt werden, um die notwendige Datengranularität zu ermöglichen?*

Nachdem die Voraussetzungen für die kontinuierliche Datenaufnahme in den vorangegangenen Methodenschritten erarbeitet wurden, wird in den folgenden Schritten die Implementierung der wertstromspezifischen Datenbank behandelt.

### **Methodenschritt 2.3: Entwurf des konzeptionellen Datenmodells**

Der dritte Methodenschritt dient der Entwicklung eines *datenbankunabhängigen Datenmodells*. Dieses verfügt über den höchsten Abstraktionsgrad und dient der Darstellung der grundlegenden Entitäten des Wertstroms sowie deren Beziehungen zueinander. Zur Umsetzung eines konzeptionellen Datenmodells wurden im Gestaltungsmodell vier Gestaltungsprinzipien zur Umsetzung definiert (vgl. Abschnitt 5.3.2.2). Zunächst werden im Rahmen der *Identifikation der Entitäten und -typen* alle für den Wertstrom relevanten Entitäten ermittelt. Hierbei wird folgende Leitfrage unterstützend herangezogen:

- *Welche Entitäten des Wertstroms müssen benannt werden, um eine vollständige digitale Abbildung des Wertstroms zu ermöglichen?*

In diesem Kontext werden alle Entitätstypen des Wertstroms erfasst und definiert. Im Anschluss werden die *Beziehungen zwischen den Entitäten* ermittelt, um die Interdependenzen innerhalb des Wertstroms zu modellieren. Dabei werden typische Beziehungen zwischen den Entitäten, wie die Verbindung zwischen zwei Prozessschritten, modelliert. Die Identifikation der Beziehungen wird durch die folgende Leitfrage unterstützt:

- *Welche übergeordneten Beziehungen bestehen innerhalb des Wertstroms und wie können diese modelliert werden?*

Im Rahmen der folgenden *Generalisierung und Spezialisierung* werden ähnliche Entitätstypen zu übergeordneten Entitäten zusammengefasst (Generalisierung) und spezifische Entitätstypen aus übergeordneten Entitätstypen (Spezialisierung) abgeleitet. Auf diese Weise wird eine angepasste Modellierung je nach Anforderung des Wertstroms ermöglicht. Abschließend erfolgt eine *Systematisierung der Attribute* der Entitäten, sodass der Detailgrad des konzeptionellen Datenmodells erhöht wird. Um die Systematisierung zu unterstützen, wird zum einen auf die vorhandene Datenbedarfsmatrix zurückgegriffen, zum anderen hilft die folgende Leitfrage:

- *Welche spezifischen Eigenschaften und Informationen sind für die Verständlichkeit und Operationalisierung der Entitäten im Wertstrom notwendig?*

Hierbei ist es essenziell, dass alle Datenpunkte aus der Datenbedarfsmatrix im konzeptionellen Datenmodell berücksichtigt werden. Dieser Schritt gewährleistet, dass alle relevanten Aspekte des Wertstroms berücksichtigt und in einer für alle Stakeholder verständlichen Form dargestellt werden. Das Ergebnis ist ein umfassendes konzeptionelles Modell, das die Interaktionen und Abhängigkeiten innerhalb des Wertstroms visualisiert und die Grundlage für die anschließende Detaillierung im logischen Datenmodell bildet.

#### **Methodenschritt 2.4: Transformation in ein logisches Datenmodell**

Anknüpfend an das konzeptionelle Datenmodell wird in Methodenschritt 2.4 ebenjenes in ein *logisches Datenmodell* überführt, das eindeutige Datendefinitionen und -beziehungen ermöglicht. Im Gestaltungsmodell wurden vier Gestaltungsprinzipien zur Entwicklung des logischen Datenmodells definiert, die bei der praktischen Umsetzung unterstützen (siehe Abschnitt 5.3.2.2). Im ersten Schritt erfolgt die *Bestimmung der Primärschlüssel* für jeden Entitätstyp. Primärschlüssel sind spezielle Attribute, die eine eindeutige Identifikation innerhalb einer Datenbank ermöglichen. Dabei sind die vier Regeln aus Gestaltungsprinzip 2.2.5 zu beachten. Um den passenden Primärschlüssel zu bestimmen, helfen die folgenden Leitfragen:

- *Welcher Primärschlüssel ermöglicht die eindeutige Identifikation des Entitätstyps innerhalb der Datenbank?*
- *Werden die Regeln zur Gestaltung eines Primärschlüssels eingehalten?*

Im Anschluss erfolgt im zweiten Schritt die *Beschreibung der Beziehungen durch Fremdschlüssel*. Fremdschlüssel sind Attribute in einer Tabelle einer Datenbank, die eine Beziehung zu einem Primärschlüssel einer anderen Tabelle ermöglichen. Um dies in der Praxis umsetzen zu können, muss die folgende Leitfrage beantwortet werden:

- *Wie werden die Beziehungen zwischen den Entitäten mithilfe von Fremdschlüsseln beschrieben, sodass eine eindeutige Verbindung zwischen den Entitäten im Wertstrom geschaffen wird?*

Nachdem die Beziehungen zwischen den Entitäten definiert sind, erfolgt im nächsten Schritt deren Detaillierung. Hierzu werden die *Datentypen der Attribute* festgelegt. Der Datentyp definiert den maximal möglichen Wertebereich der gespeicherten Informationen sowie die notwendige Speicherkapazität. Um den Speicherplatzbedarf zu minimieren, ist ein möglichst kompakter Datentyp zu wählen, der die notwendige Auflösung der Daten sicherstellt. Zur Ermittlung der jeweiligen Datentypen hilft die in Anhang A.5 dargestellte Tabelle zur *Übersicht über bestehende Datentypen*. Um Redundanzen im logischen Datenmodell zu vermeiden, wird im letzten Schritt eine *Normalisierung des Datenmodells* vorgenommen. Die Normalisierung zielt darauf ab, das Datenmodell in kleine und gut strukturierte Tabellen zu unterteilen, um die Datenintegrität und eine verschwendungsarme Datenverwaltung zu gewährleisten.

Durch die Umsetzung dieser Schritte wird ein logisches Datenmodell erstellt, das die Basis für die Implementierung des physischen Datenmodell bildet. Dieser gewährleistet eine präzise Definition der Datenstruktur und eine klare Beschreibung der Beziehungen zwischen den Daten. Auf diese Weise wird eine effektive Datenverarbeitung und -analyse im weiteren Verlauf ermöglicht.

#### **Methodenschritt 2.5: Auswahl eines Datenbankmanagementsystems**

Methodenschritt 2.5 ist der vorbereitende Schritt zur Überführung des logischen Datenmodells in eine explizite Datenbankstruktur. Dabei wird ein *Datenbankmanagementsystem ausgewählt*, das die spezifischen Anforderungen der Datenspeicherung und -verarbeitung erfüllt. Dieser Schritt ist essenziell, um die Datenstruktur des Wertstroms effizient zu organisieren. Basierend auf den in Gestaltungsprinzip 2.2.9 definierten Kriterien und der in Anhang A.7 aufgeführten Tabelle – *Übersicht über Datenbanktypen* – kann eine Auswahl des Datenbankmanagementsystems erfolgen. Liegen sowohl Zeitreihendaten als auch statische Metadaten für einen Wertstrom vor, eignet sich beispielsweise ein hybrides Datenbankmanagementsystem, während für einen Wertstrom mit einer geringen Anzahl an Datenpunkten eine relationale Datenbank ausreichend ist.

#### **Methodenschritt 2.6: Implementierung Datenbereinigung und -vorverarbeitung**

Ziel des sechsten Methodenschrittes ist die Sicherstellung einer hohen Datenqualität durch die systematische *Bereinigung und Vorverarbeitung der im Wertstrom erfassten Daten*. Hierfür werden die in Gestaltungsprinzip 2.3.1 definierten fünf Qualitätsdimensionen *Genauigkeit, Vollständigkeit, Konsistenz, Aktualität* und *Relevanz* angewendet. Die Implementierung der Datenbereinigung und -vorverarbeitung erfolgt parallel zur Umsetzung des physischen Datenmodells. Durch den iterativen Charakter der beiden Methodenschritte wird eine kontinuierliche Verbesserung der Datenqualität unterstützt. Hierbei ist es essenziell, dass die Wertstrommanager:innen gemeinsam mit den für die Implementierung der Datenbank verantwortlichen IT-Spezialist:innen zusammenarbeiten, um die Funktionsfähigkeit der Datenbank und der parallel laufenden Datenverarbeitungsschritte sicherzustellen.

### **Methodenschritt 2.7: Umsetzung des physischen Datenmodells**

Die *Umsetzung des physischen Datenmodells* ist der entscheidende Schritt zur Etablierung eines virtuellen Objektes des Wertstroms. Das Ziel ist die Erstellung einer funktionsfähigen Datenbank, die auf dem zuvor entwickelten logischen Datenmodell basiert und eine präzise Speicherung sowie Verarbeitung der erfassten Daten gewährleistet. Da die Realisierung des physischen Datenmodells spezifisches IT-Wissen im Bereich der Datenbankimplementierung erfordert, sind IT-Expert:innen notwendig, um die Datenbankerstellung zu übernehmen. Dies umfasst die Strukturierung der Tabellen, die Definition der Datentypen sowie die Integration der Rohdaten aus den bestehenden IT-Systemen und der multimodalen Datenaufnahme. Da es sich bei diesem Methodenschritt um einen nicht standardisierbaren Prozess handelt, der sowohl von der Auswahl des Datenbankmanagement-Systems als auch dem entwickelten Datenmodell abhängt, wird an dieser Stelle auf eine Detaillierung verzichtet. Sobald die Funktionsfähigkeit des physischen Datenmodells inklusive der implementierten Datenbereinigung und -vorverarbeitung sichergestellt ist, ist der zweite Methodenbaustein abgeschlossen. Das Zwischenergebnis stellt die implementierte virtuelle Ebene des Wertstroms dar.

#### 6.2.3 Methodenbaustein 3: Gestaltung Verbindungsebene

Methodenbaustein 3, die Gestaltung der Verbindungsebene, konzentriert sich auf die Umsetzung des Informationsrückflusses aus der virtuellen in die physische Ebene. Der Methodenbaustein unterteilt sich hierzu in vier Schritte.

### **Methodenschritt 3.1: Durchführung Daten- und Zeitreihenanalyse**

Methodenschritt 3.1 zielt darauf ab, mithilfe von statistischen und grafischen Analyseverfahren die Struktur und Hauptmerkmale der Daten zu verstehen, um eine qualitativ hochwertige Grundlage für zukünftige Analysen und Entscheidungen im Rahmen des Wertstrommanagements zu schaffen. Die *Durchführung der Daten- und Zeitreihenanalyse* beginnt mit der Anwendung statistischer Methoden, um zentrale Tendenzen, Streuungen und die allgemeine Datenstruktur zu verstehen. Maße wie Mittelwert, Median und Standardabweichung werden für jeden Prozessschritt verwendet, um einen Überblick über die Verteilung der Daten zu erhalten. Anschließend wird eine Zeitreihenanalyse durchgeführt, um temporäre Veränderungen, Saisonalitäten oder zyklische Muster im historischen Verlauf zu identifizieren, welche Einfluss auf die Leistung des Wertstroms besitzen. Folgende Leitfragen unterstützen bei der Durchführung dieses Methodenschrittes:

- *Liegen Anomalien, Muster oder Trends in den Produktionsdaten vor, die auf instabile Prozesse oder fehlerhafte Rückmeldungen zurückzuführen sind?*
- *Liegen temporäre Veränderungen, Saisonalitäten oder zyklische Muster innerhalb der historischen Daten vor, die eine Anpassung des Wertstroms erfordern?*

Die Visualisierung der Analyseergebnisse mithilfe von Grafiken wie Boxplots und Histogrammen spielt eine entscheidende Rolle, um die Dateneinträge in der Datenbank zu

verifizieren. Erst wenn das physische Datenmodell plausible Kennzahlen erzeugt, wird mit dem nächsten Schritt im Rahmen der Gestaltung der Verbindungsebene fortgefahren.

Um den Informationsrückfluss von der virtuellen Ebene in den Wertstrom sicherzustellen, ist eine Visualisierung der Ergebnisse in Form einer Wertstromkarte unabdingbar. Die Methodenschritte 3.2 und 3.3 unterstützen daher bei der Auswahl einer geeigneten Softwarelösung, welche die Visualisierung des Wertstroms umsetzt und die Daten für das Wertstrommanagement in geeigneter Form bereitstellt.

### **Methodenbaustein 3.2: Definition und Gewichtung der Anforderungen an die Softwarelösung**

Methodenschritt 3.2 unterstützt bei der *Definition der Anforderungen an die Softwarelösung*. Zur Strukturierung der Anforderungen werden diese in funktionale, nicht-funktionale und organisatorische Randbedingungen unterteilt, um ihre Spezifikationen zu strukturieren. Bei der Definition der Anforderungen helfen die folgenden Leitfragen und das Gestaltungsprinzip 3.2.1:

- *Welche Kernfunktionalitäten muss die Softwarelösung besitzen, um den Wertstrom abbilden zu können?*
- *Welche weiteren Attribute, wie Benutzer:innen-Freundlichkeit, Skalierbarkeit, Performance etc., muss die Softwarelösung erfüllen, um einen Mehrwert für das Wertstrommanagement zu bieten?*
- *Welche organisatorischen und rechtlichen Rahmenbedingungen müssen bei der Implementierung der Softwarelösung berücksichtigt werden?*

Durch die Beantwortung der Fragen entsteht eine ungewichtete Liste an Anforderungen. Die *Gewichtung dieser Anforderungen* ist essenziell, um eine Softwarelösung auswählen zu können, die flexibel auf Veränderungen im Produktionsprozess reagieren kann, die erforderlichen Schnittstellen und Datenformate unterstützt und somit eine nahtlose Integration in bestehende Systeme ermöglicht. Dabei ist es elementar, einen methodischen Ansatz zu verwenden, der jede Anforderung individuell hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Wertstrommanagement bewertet. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wird für die Bewertung ein Paarvergleich verwendet. Dieses Vorgehen ist in der industriellen Praxis bekannt und erlaubt es, durch den direkten Vergleich zweier Kriterien deren relative Wichtigkeit festzulegen. Weitere Informationen zur Durchführung des Paarvergleichs finden sich in Gestaltungsprinzip 3.2.1. Das Ergebnis des Paarvergleichs stellt eine gewichtete Liste an Anforderungen bereit. Diese dienen im Folgenden als Grundlage für die Auswahl und Bewertung von Softwarelösungen, die die spezifischen Anforderungen des Wertstrommanagements erfüllen sollen.

### **Methodenbaustein 3.3: Selektion der Softwarelösung**

Im Anschluss an die Gewichtung der Anforderungen werden in Methodenbaustein 3.3 bestehende Softwarelösungen am Markt identifiziert, die sich für die Nutzung im Wertstrommanagement eignen. Ziel ist es, eine Liste von Softwarelösungen zu erstellen, die

potenziell die zuvor gewichteten Anforderungen erfüllen. Um diesen Prozess zu unterstützen, wurde im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit eine Analyse bestehender Softwarelösungen zur Eignung für die Nutzung im Wertstrommanagements durchgeführt (siehe Anhang A.8). Diese Tabelle dient als Ausgangspunkt für die Recherche, ersetzt jedoch keine eigenständige Recherche, da die Aktualität der Tabelle nicht gewährleistet ist. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die anschließende Auswahl und detaillierte Bewertung der Softwarelösungen. Um eine objektive Bewertung sicherzustellen, müssen für die Anforderungen individuelle quantitative Bewertungsmöglichkeiten erarbeitet werden. Um die quantitativen Bewertungsmöglichkeiten je Anforderung zu realisieren, helfen folgende Leitfragen sowie die Informationen in Gestaltungsprinzip 3.2.2:

- *Lässt die Anforderung eine binäre Bewertung zu?*
- *Muss die Anforderung einen Minimalwert erfüllen und erhält danach einen höheren Teilnutzenwert, je besser sie die Anforderung erfüllt?*
- *Welche Abstufungen sind für eine quantifizierbare Anforderung notwendig?*

Die Einbindung von Stakeholdern in den Bewertungs- und Auswahlprozess ist elementar, um eine holistische Perspektive zu gewährleisten und die Bedürfnisse aller Beteiligten zu adressieren. Durch die Beachtung dieser Aspekte wird die Auswahl der Softwarelösung zu einem kritischen und individuell angepassten Prozess, der die effektive Implementierung und langfristige Nutzung des Digitalen Wertstromzwillings sicherstellt. Am Ende dieses Prozesses steht eine Softwarelösung, welche die Anforderungen bestmöglich erfüllt und somit für die Verwendung im Wertstrommanagement geeignet ist.

#### **Methodenbaustein 3.4: Anbindung des physischen Datenmodells**

Nach der Auswahl der geeigneten Softwarelösung erfolgt im Methodenbaustein 3.4 die *Anbindung des physischen Datenmodells* an die Softwarelösung. Diese Verbindung ermöglicht den Informationsfluss aus dem Wertstrom in das digitale Wertstromabbild und ermöglicht auf diese Weise die Unterstützung des Wertstrommanagements.

Die Verifikation der Schnittstelle erfordert Tests, welche sowohl die technische Implementierung als auch die tatsächliche Leistung und Zuverlässigkeit der Datenübertragung umfassen. Diese Tests müssen in realen Betriebsbedingungen durchgeführt werden, um die Funktionsfähigkeit der Schnittstelle zu evaluieren und gegebenenfalls anzupassen.

#### **Methodenbaustein 3.5: Visualisierung des Wertstroms**

Die *Visualisierung des Wertstroms* bildet den abschließenden Schritt in der technischen Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings. Ziel ist es, die verarbeiteten Daten des Wertstroms transparent darzustellen, um eine Übersicht über den Wertstrom zu bieten und somit das Management des Wertstroms zu ermöglichen. Interaktive Elemente, wie Drill-Down-Funktionen oder dynamische Filter, unterstützen Nutzer:innen dabei, spezifische Prozessschritte oder -verbindungen zu untersuchen und dynamische Analysen der Leistung des Wertstroms durchzuführen. Die Auswahl und Anwendung der Visualisierungstechniken müssen dabei auf den Kontext des Wertstrommanagements und die

vorliegenden Daten abgestimmt sein. Die Implementierung der Visualisierung bildet den Abschluss der technischen Umsetzung des Digitalen Wertstromzwillings und macht diesen für den Einsatz im Rahmen des Wertstrommanagements bereit.

### 6.3 Methodenbaustein 4: Anwendung im Wertstrommanagement

Die Anwendung des Digitalen Wertstromzwillings im Wertstrommanagement folgt einem vierstufigen Vorgehen, das an den *Phasen des PDCA-Zyklus* orientiert ist [KLET22]. Der Methodenbaustein 4 stellt daher einen zyklischen Ablauf zur kontinuierlichen Verbesserung des Wertstroms dar, der in regelmäßigen Abständen durchlaufen wird, um die Phasen *Check* und *Act* des PDCA-Zyklus zu ermöglichen (vgl. Abbildung 46). Hierbei ist die Regelmäßigkeit individuell zu definieren und abhängig vom betrachteten Anwendungsfall und den bestehenden Kommunikationsregeln im Unternehmen.

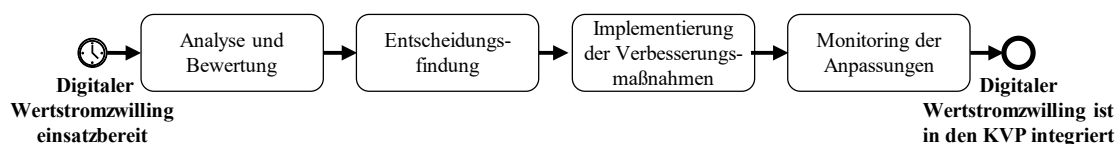


Abbildung 46: Methodenbaustein 4 – Anwendung im Wertstrommanagement

#### Methodenschritt 4.1: Analyse und Evaluation

Im ersten Schritt erfolgt die *Analyse und Evaluation* des aktuellen Wertstroms anhand der durch den Digitalen Wertstromzwillling aufbereiteten Daten. Die Zielsetzung der Analyse und Evaluation besteht in der Identifikation systematischer Abweichungen entlang des Wertstroms, welche nicht auf einzelnen Ausreißern basieren, sondern einem strukturellen Problem zugrunde liegen. Dies stellt einen Unterschied zur klassischen Wertstrommethode dar (vgl. Abschnitt 2.2.2). Der Fokus wird von einer einmaligen Momentaufnahme vor Ort verschoben hin zu einem kontinuierlichen Monitoring des Wertstroms, sodass die objektive Analyse und Evaluation der identifizierten Verbesserungspotenziale ermöglicht werden. Hierbei unterstützen die folgenden Leitfragen:

- *Liegen im aktuellen Wertstrom Abweichungen zum definierten Soll-Zustand vor?*
- *Existieren systematische Abweichungen vom Soll-Zustand in den Prozessschritten oder -verbindungen, die nicht auf Ausreißer in den Daten zurückzuführen sind und eine Anpassung erfordern?*
- *Welche Verbesserungspotenziale lassen sich aus den identifizierten Abweichungen ableiten?*

Die Beantwortung der Fragen erfolgt durch die für den Wertstrom verantwortlichen Personen und ist in bereits etablierte Verbesserungsrunden, wie beispielsweise das Shopfloor

Management<sup>13</sup>, zu integrieren. Da die Integration in jedem Unternehmen individuell erfolgen muss, ist dies nicht Teil der vorliegenden Forschungsarbeit.

#### **Methodenschritt 4.2: Entscheidungsfindung**

Auf Basis der identifizierten Verbesserungspotenziale wird im Rahmen der *Entscheidungsfindung* definiert, welche Maßnahmen zur Verbesserung des Wertstroms umgesetzt werden. Dieser Schritt umfasst die Priorisierung der Maßnahmen anhand ihres potenziellen Beitrags zur Steigerung der Effizienz und Reduktion der Verschwendung. Die erzeugte Datenbasis unterstützt an dieser Stelle. Für die Entscheidungsfindung muss jedoch zwingend auf Fachpersonal aus dem Wertstrom zurückgegriffen werden, um die ganzheitliche Perspektive der Auswirkungen einer einzelnen Verbesserung abzuschätzen. Die nachstehenden Leitfragen helfen bei der Entscheidungsfindung:

- *Nach welchen Kriterien wird die Priorisierung der identifizierten Verbesserungspotenziale vorgenommen? Welche Zielgrößen der Produktion werden verwendet?*
- *Welche Ressourcen sind für die Umsetzung der Maßnahmen erforderlich und sind diese verfügbar?*
- *Wie viel Zeit wird für die Umsetzung der ausgewählten Maßnahmen benötigt?*

Wichtig ist, sowohl organisatorische als auch technische Aspekte bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Bei umfangreichen Anpassungen des Wertstroms können zusätzlich Simulationen durchgeführt werden, um die Wirksamkeit der Maßnahmen im Vorfeld zu bewerten und Fehlentscheidungen zu vermeiden.

#### **Methodenschritt 4.3: Implementierung der Verbesserungsmaßnahmen**

Nach der Entscheidungsfindung erfolgt die *Implementierung der Verbesserungsmaßnahmen*. Da es sich hierbei um eine Anpassung auf physischer Ebene handelt, ist die Erfahrung der Beteiligten von entscheidender Bedeutung für den Erfolg der Maßnahmen. Da es sich bei diesem Schritt um einen sehr praxisorientierten Methodenschritt handelt und die Umsetzung für jeden Anwendungsfall individuell erfolgt, kann dieser Schritt nicht weiter detailliert werden.

#### **Methodenschritt 4.4: Monitoring der Anpassungen**

Der letzte Schritt der Methode beinhaltet das kontinuierliche *Monitoring der Anpassungen*. Dies entspricht der Phase *Check* des PDCA-Zyklus und wird erst durch die Integration des Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement ermöglicht. Dieser Schritt gewährleistet, dass die implementierten Maßnahmen die gewünschten Effekte erzielen. Werden die gewünschten Effekte nicht erzielt, werden weitere Anpassungen vorgenommen – dies entspricht der *Act*-Phase des PDCA-Zyklus – bis die Maßnahmen die gewünschten Effekte erzielen. Durch diese Anpassungen entstehen Veränderungen im

---

<sup>13</sup> Unter Shopfloor Management versteht man die „Führung am Ort des Geschehens“. Ziel ist es, die reaktive Erreichung der operativen Ziele sicherzustellen und die proaktive Verbesserung der organisatorischen und technischen Prozesse zu strukturieren [METT24].



Wertstrom und somit auch in den neu aufgenommenen Daten, wodurch der Regelkreis des Informationsflusses geschlossen wird. Auf diese Weise können neue Analysen und Evaluationen durchgeführt werden und der PDCA-Zyklus wird erneut durchlaufen. Die folgenden Leitfragen sollen bei der Umsetzung des Monitorings der Anpassungen unterstützen:

- *In welchen Abständen werden die implementierten Maßnahmen und deren Wirkung auf den Wertstrom überprüft?*
- *Sind Anpassungen am Digitalen Wertstromzwillings notwendig, da die Verbesserungsmaßnahmen eine physische Anpassung des Wertstroms bedingen?*

Der beschriebene zyklische Prozess unterstreicht die Bedeutung des Digitalen Zwillings als integratives Element zur Realisierung eines erfolgreichen Wertstrommanagements innerhalb eines Unternehmens. Der Digitale Wertstromzwillings ermöglicht die Planung, Durchführung, Kontrolle und Anpassung von Verbesserungsmaßnahmen und trägt somit zur kontinuierlichen Verbesserung des Wertstroms bei.

#### **6.4 Zwischenfazit**

Im Rahmen des Kapitels wurde ein strukturierter und methodischer Rahmen zur Implementierung und Anwendung des Digitalen Wertstromzwillings im Kontext des Wertstrommanagements erarbeitet.

Die Methode gliedert sich in vier Methodenbausteine (Abschnitt 6.1). Während die ersten drei Bausteine die technische Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings behandeln (Abschnitt 6.2), liegt der Fokus des letzten Bausteins auf der Anwendung im Wertstrommanagement (Abschnitt 6.3). Die Bausteine wurden in einzelne Schritte unterteilt und für jeden Schritt wurden unterstützende Leitfragen formuliert, die bei der Anwendung der Methode helfen.

Zusammenfassend bietet die entwickelte Methode einen systematischen Ansatz zur Integration des Digitalen Zwillings in das Wertstrommanagement. Die detaillierte Darstellung der Methodenbausteine sowie die Berücksichtigung der Schnittstellen zwischen der physischen und virtuellen Ebene des Wertstroms unterstreichen den innovativen Charakter der Methode und ihr Potenzial, zur Weiterentwicklung der statischen Wertstrommethode zu einem Management-Ansatz beizutragen. Hiermit wurde das **dritte Forschungsziel**, die *Entwicklung einer Methode zur Implementierung*, erreicht. Um das übergeordnete Forschungsziel abschließend zu erreichen, werden im Folgenden sowohl das entwickelte Gestaltungsmodell (vgl. Kapitel 1) als auch die Methode (vgl. Kapitel 6) in der industriellen Praxis angewendet und deren Wirksamkeit evaluiert.



## 7 ANWENDUNG UND EVALUATION

Die Evaluation im Anwendungszusammenhang ist Teil der Strategie der angewandten Forschung nach ULRICH und dient in der vorliegenden Arbeit der wissenschaftlichen Bewertung des entwickelten Gestaltungsmodells sowie der Methode [ULRI84]. Daher findet die Anwendung (Abschnitt 7.1) sowohl in der industriellen Praxis als auch in einer standardisierten Laborumgebung statt. Die anschließende Evaluation (Abschnitt 7.2) überprüft, ob das definierte Forschungsziel erreicht ist und die gestellten Anforderungen erfüllt sind, bevor abschließend ein Fazit gezogen wird (Abschnitt 7.3).

### 7.1 Anwendung

Sowohl das Gestaltungsmodell als auch die Methode zur Implementierung ebenjenes sollen in der industriellen Praxis anwendbar sein. Aus diesem Grund erfolgt die Umsetzung des Gestaltungsmodells in zwei industriellen Umfeldern. Während im Unternehmen der Lebensmittelindustrie ebenso die Anwendbarkeit des Digitalen Wertstromzwillings im operativen Tagesgeschäft gezeigt werden konnte, konnte dies im Unternehmen der Printmedienindustrie aufgrund zeitlicher Einschränkungen im Anwendungsunternehmen nicht durchgeführt werden. Aufgrund des hohen Zeitaufwands erfolgt die Anwendung der Methode in einer standardisierten Laborumgebung an der TU Darmstadt (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Übersicht der Anwendungsfälle

Anwendungsfall	Branche	Anzahl Mitarbeitende	Umsatz	Art der Anwendung
1	Printmedienindustrie	9.500	2,44 Mrd. €	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anwendung des Gestaltungsmodells (Fokus virtuelle Ebene)</li> </ul>
2	Lebensmittelindustrie	37.000	17,00 Mrd. €	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anwendung des Gestaltungsmodells (Fokus Verbindungsebene)</li> <li>Überprüfung der Wirksamkeit des Digitalen Wertstromzwillings</li> </ul>
3	Standardisierte Laborumgebung	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anwendung des Gestaltungsmodells (Fokus alle drei Ebenen)</li> <li>Anwendung der Methode</li> </ul>

#### 7.1.1 Anwendung des Gestaltungsmodells in der Printmedienindustrie

Nachstehend wird die Anwendung des Gestaltungsmodells in einem Großunternehmen der Printmedienindustrie beschrieben. Das Unternehmen produziert Druckmaschinen für die Printmedienindustrie und beschäftigt weltweit über 9.500 Mitarbeitende. Der jährliche Umsatz beträgt 2,44 Mrd. €. Für die Anwendung des Gestaltungsmodells wird die Produktion eines Zahnrad an zwei Standorten in Deutschland betrachtet. Dabei wird insbesondere der Datenaustausch über Standort- und IT-Systemgrenzen betrachtet sowie die Implementierung der virtuellen Ebene inkl. eines wertstromspezifischen Datenmodells fokussiert.

### Gestaltungsdimension 1: Physische Ebene

Zunächst wird der *Betrachtungsgegenstand* für die Implementierung des Gestaltungsmodells bestimmt. Das betrachtete Produkt ist ein gegossenes Zahnrad, das am ersten Standort zunächst aus Formen und Rohmaterial gegossen wird und einer ersten mechanischen Nachbehandlung unterzogen wird. Am zweiten Standort erfolgen die mechanische Bearbeitung und die anschließende Montage in die Druckmaschine. Eine Darstellung des Wertstroms befindet sich in Abbildung 64 in Anhang A.10. Die Abgrenzung des Wertstroms ist Abbildung 47 zu entnehmen.

Ziel des Unternehmens ist es, ein digitales Abbild des Wertstroms zu erstellen, um auf dessen Basis Verbesserungsprojekte zu initiieren (*Anwendungsfall Wertstrommanagement*) und die *Transparenz über die Standortgrenzen* hinweg zu erhöhen. Dabei sind insbesondere bauteilindividuelle Bearbeitungs- und Zykluszeiten, Liegezeiten, die zugehörigen Qualitätsdaten sowie die Durchlaufzeit von Bedeutung. Die *Datenaufnahme* zeigt, dass die hierfür notwendigen Start- und Endzeitstempel nur in den Bereichen Form- und Gießprozess in Access-Datenbanken vorliegen. Eine individuelle Verfolgung ab dem Bereich Nachbehandlung ist derzeit nicht möglich. Hierfür wurde daraufhin eine zusätzliche Anwendung in der Produktion bereitgestellt, die die An- und Abmeldung der Bauteile an den Prozessschritten ermöglicht. Auf diese Weise wurde die *multimodale Datenaufnahme* in der Produktion sichergestellt. Die entsprechende Datenbedarfsmatrix ist in Tabelle 27 bis Tabelle 31 in Anhang A.10 dargestellt.

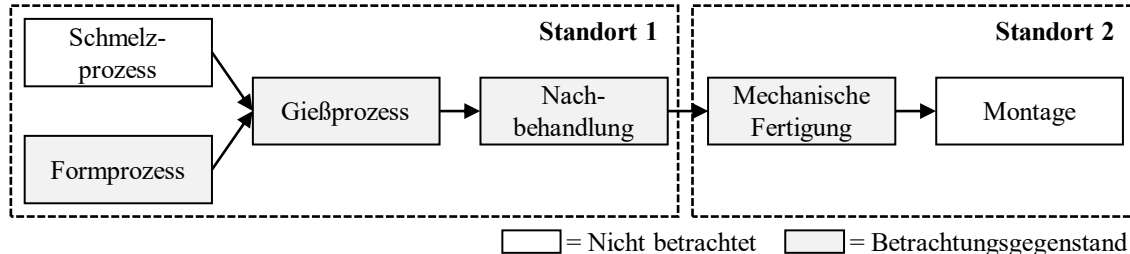


Abbildung 47: Gestaltungsprinzip 1.1 – Betrachtungsgegenstand Wertstrom

### Gestaltungsdimension 2: Virtuelle Ebene

Die *historische Datenspeicherung* der relevanten Daten erfolgt in einer unternehmenseigenen Cloud. In den Bereichen Form- und Gießprozess erfolgt eine automatisierte Erfassung mithilfe von RFID-Readern, während in der Nachbehandlung und mechanischen Fertigung eine teilautomatisierte Erfassung über Terminals und die von IT-Spezialist:innen neu entwickelte Anwendung erfolgt. Beide Systeme sind mithilfe einer TCP/IP-Verbindung (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) über einen Industrial Ethernet Anschluss an die unternehmenseigene Cloud angebunden. Die spezifischen Speicherorte sind eindeutig für jeden Prozessschritt benannt und alle Datenpunkte sind mit eindeutigen Zeitstempeln versehen, sodass die eindeutige Datenzuordnung gewährleistet ist. Eine zusätzliche *Modellierung* der Daten ist notwendig, da eine Verknüpfung zwischen unterschiedlichen Verfolgungsebenen realisiert werden muss. Während im Form- und

Gießprozess eine Verfolgung einer Gießform mit drei Zahnrädern erfolgt, ist ab der Nachbehandlung eine bauteilindividuelle Verfolgung zu realisieren. Demnach setzen sich die Entitäten des *konzeptionellen Datenmodells* aus Prozessen, Bauteilen und Losen zusammen. Die Prozesse werden durch eine Standortzuordnung und Beschreibung der verwendeten Maschinen weiter spezialisiert. Die Verknüpfung zwischen Losen und Bauteilen erfolgt über den Fertigungsauftrag. Das Ergebnis der im Anschluss erfolgten Transformation in das *logische Datenmodell* ist in Abbildung 48 dargestellt.

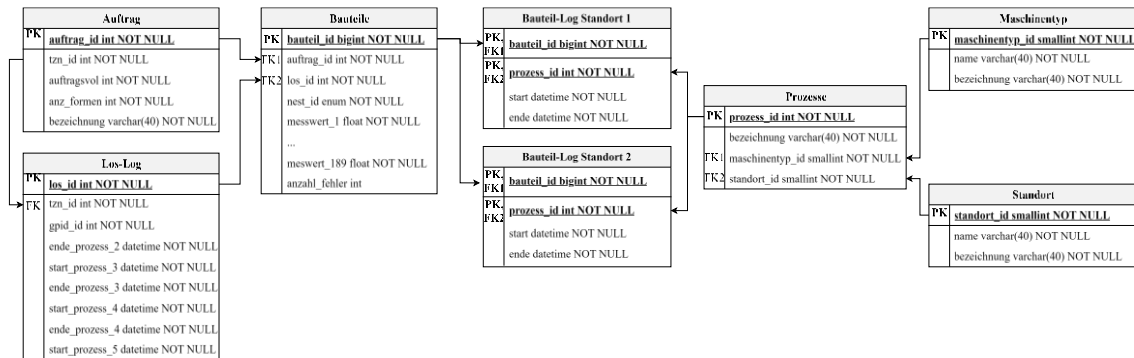


Abbildung 48: Gestaltungsprinzipien 2.2.5-2.2.8 – Logisches Datenmodell

Für die Implementierung des *physischen Datenmodells* wurde das hybride Datenbankmanagement-System TimescaleDB verwendet. Die Entscheidung wurde getroffen, da das Unternehmen plant, in Zukunft auch Daten aus dem Schmelzprozess zu integrieren und hier eine große Datenmenge erwartet wird, die in einem hybriden Datenbankmanagement-System leichter zu verarbeiten ist (vgl. Gestaltungsprinzip 2.2.9). Abschließend wurden die Access-Tabellen sowie die Daten aus der multimodalen Datenaufnahme an die Datenbank angeschlossen. Gleichzeitig wurde eine *Datenverarbeitung* durchgeführt, um sicherzustellen, dass keine fehlerhaften Daten in die Datenbank übertragen werden. Das Vorgehen zur Datenbereinigung ist in Abbildung 49 dargestellt.

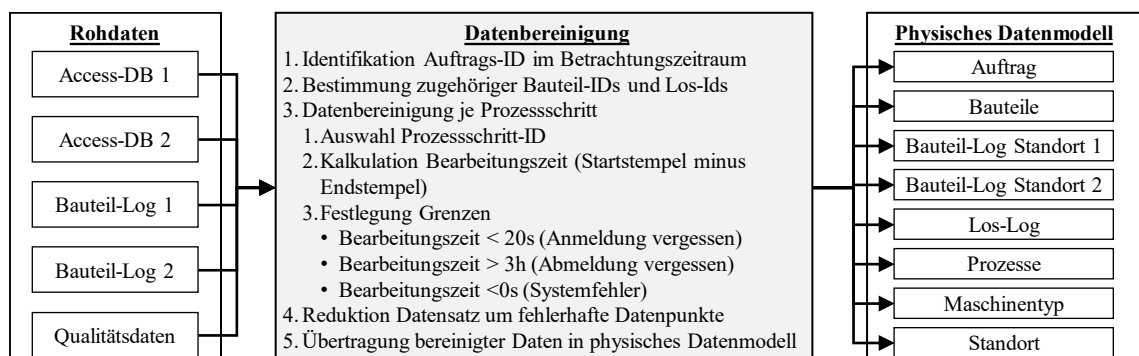


Abbildung 49: Vorgehen zur Datenbereinigung

Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass keine fehlerhaften Datenpunkte, bspw. erzeugt durch eine fehlende An- oder Abmeldung an einem Prozessschritt oder einen Systemfehler, in das physische Datenmodell gespeichert wurden. Die anschließend durchgeführte

Überprüfung der Datenqualität anhand der Dimensionen *Vollständigkeit*<sup>14</sup> und *Genauigkeit*<sup>15</sup> am Beispiel der Tabellen *Bauteil-Log Standort 1* und *Bauteil-Log Standort 2* ist in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Datenqualität Anwendungsfall Printmedienindustrie<sup>16</sup>

Anzahl Datenpunkte	Bauteil-Log Standort 1				Bauteil-Log Standort 2			
	Prozess 5	Prozess 6	Prozess 7	Prozess 9	Prozess 10	Prozess 11	Prozess 12	
Soll	30	18	48	48	48	48	48	
Vor Bereinigung	30	18	48	41	47	37	32	
Nach Bereinigung	30	18	48	41	44	35	32	
Vollständigkeit	100%	100%	100%	85%	98%	77%	67%	
Genauigkeit	100%	100%	100%	100%	94%	95%	100%	

Die Ergebnisse zeigen, dass über den Wertstrom verteilt eine sehr gute Datenqualität vorhanden ist, die lediglich an einzelnen Prozessschritten Verbesserung bedarf. Hierzu wurde eine Schulung der Mitarbeitenden durchgeführt und auf die Wichtigkeit der An- und Abmeldung an den Prozessschritten hingewiesen. Im Anschluss konnte die Datenqualität weiter gesteigert werden.

### Gestaltungsdimension 3: Verbindungsebene

Im Bereich der dritten Gestaltungsdimension wurden die beiden Schnittstellen zwischen der physischen und virtuellen Ebene implementiert. Für die *Schnittstelle physisch/virtuell* musste keine Entscheidung bzgl. der Kommunikationstechnologien und -protokolle getroffen werden. Aufgrund des hohen Implementierungsaufwands einer Schnittstelle zwischen den bestehenden IT-Systemen und der unternehmenseigenen Cloud wurde sich im Projektteam dafür entschieden, den Datenabzug zunächst manuell durchzuführen und an den definierten Speicherorten abzulegen. Für die *Schnittstelle virtuell/physisch* sieht das Gestaltungselement 3.2 die Auswahl einer anwendungsfallspezifischen Softwarelösung vor. Da im Unternehmen bereits eine Softwarelösung für die Visualisierung von Produktionsdaten etabliert ist, entfällt der Auswahlprozess. Ein Nachbau der Visualisierung findet sich in Abbildung 50. Aufgrund der Datenschutzrichtlinien des Unternehmens, dürfen die Original-Bilder nicht verwendet werden. Für die Visualisierung wurde eine prozessspezifische Darstellung mit einem historischen Verlauf der Zyklus- und Liegezeiten sowie ein Histogramm über die Verteilung der Zykluszeiten umgesetzt. Ziel des

<sup>14</sup> Die Vollständigkeit berechnet sich, indem die Anzahl der verfügbaren Datenpunkte vor der Datenbereinigung geteilt wird durch die Soll-Anzahl.

<sup>15</sup> Die Genauigkeit berechnet sich, indem die Anzahl der verfügbaren Datenpunkte nach der Datenbereinigung durch die verfügbare Anzahl vor der Datenbereinigung geteilt wird.

<sup>16</sup> Aufgrund der Datenschutzrichtlinien des Unternehmens ist eine Veröffentlichung der zugrundeliegenden Rohdaten nicht gestattet, da diese Informationen das Kerngeschäft des Unternehmens offenlegen und daher streng vertraulich behandelt werden müssen.

Unternehmens war es, einen Überblick über die Schwankungen bei den Zyklus- und Liegezeiten innerhalb eines Auftrages zu bekommen, um Verbesserungspotenziale zu identifizieren.

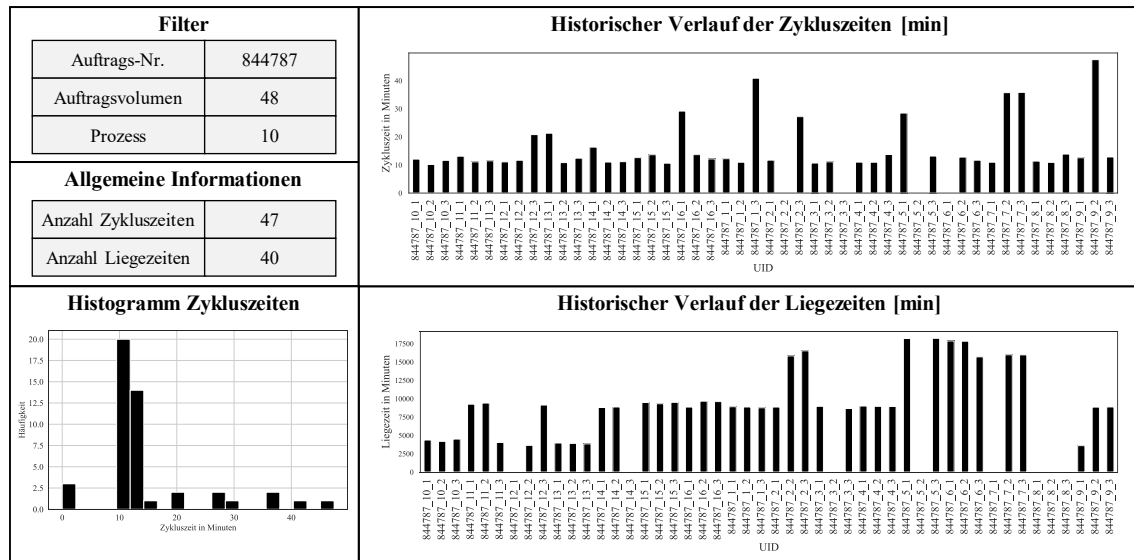


Abbildung 50: Prozessspezifische Visualisierung Printmedienindustrie<sup>17</sup>

Insbesondere ermöglicht die Anwendung eine detaillierte Analyse des standortübergreifenden Wertstroms, welche einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der PPS leistet. Die präzise Erfassung und Visualisierung der Produktionsdaten zeigt, dass am Standort 2 bereits abgestimmte Prozesse in Bezug auf die Zykluszeiten und Lagerhaltung etabliert sind, während am Standort 1 noch keine entsprechende Abstimmung vorhanden ist. Diese Diskrepanz zwischen den Standorten wird durch die Anwendung des Digitalen Wertstromzwillings sichtbar und quantifizierbar. Weiterhin zeigte sich, dass durch die Nichteinhaltung der Reihenfolge bei der Entnahme aus dem Zwischenlager die Liegezeiten der individuellen Zahnräder stark schwanken, was einen großen Einfluss auf die Gesamtdurchlaufzeit der Zahnräder besitzt. So schwanken die Gesamtdurchlaufzeiten zwischen 300 Stunden und 900 Stunden je nach betrachtetem Bauteil. Um dies in Zukunft zu vermeiden, wird das Unternehmen eine fest definierte Entnahme-Reihenfolge im Lagermanagement-System integrieren, um die chaotische Ein- und Auslagerung im zentralen Zwischenlager nach dem FiFo-Prinzip zu steuern. Das Gestaltungsmodell hat somit nicht nur die Schwachstellen aufgezeigt, sondern auch eine praxisnahe Lösung bereitgestellt, welche die Transparenz über die Standortgrenzen hinweg erhöht. Auf diese Weise wurde die standortübergreifende, kontinuierliche Verbesserung ermöglicht und das Unternehmen ist nun in der Lage, eine nachhaltige Verbesserung der Produktionsabläufe zu realisieren.

<sup>17</sup> Aufgrund der Datenschutzrichtlinien des Unternehmens ist eine Veröffentlichung der zugrundeliegenden Rohdaten nicht gestattet, da diese Informationen das Kerngeschäft des Unternehmens offenlegen und daher streng vertraulich behandelt werden müssen.

### 7.1.2 Anwendung des Gestaltungsmodells in der Lebensmittelindustrie

Im Folgenden wird die Anwendung des Gestaltungsmodells in einem Großunternehmen der Lebensmittelindustrie mit weltweit über 37.000 Mitarbeitenden und einem jährlichen Umsatz von 17,00 Mrd. € beschrieben. Das Unternehmen produziert an seinem Standort in Deutschland Konsumgüter für den Einzelhandel und ist in vier Produktionseinheiten unterteilt. Die Anwendung des Gestaltungsmodells erfolgte im Rahmen einer Masterarbeit vor Ort und wurde durch den Verfasser der Forschungsarbeit systematisch begleitet [FREI21]. Aufgrund der umfangreichen Datenverfügbarkeit entlang des Wertstroms wird bei der Anwendung insbesondere die Umsetzung der Verbindungsebene inkl. des Informationsrückflusses aus der virtuellen in die physische Ebene fokussiert.

#### Gestaltungsdimension 1: Physische Ebene

Zunächst wird der *Betrachtungsgegenstand* für die Anwendung des Gestaltungsmodells bestimmt. Die betrachtete Produktfamilie wird in einer isolierten automatisierten Produktionslinie hergestellt. Die Abgrenzung des Wertstroms ist Abbildung 51 zu entnehmen, wobei die drei betrachteten Bereiche aus weiteren Prozessschritten bestehen.



Abbildung 51: Gestaltungselement 1.1 – Betrachtungsgegenstand Wertstrom

Das Ziel des Unternehmens ist es, ein kontinuierliches Monitoring der Produktionslinie zu gewährleisten (*Anwendungsfall Wertstrommanagement*). Da die Produktionslinien in der Lebensmittelindustrie weitestgehend verkettet und automatisiert sind, sind insbesondere die Kapazität und Auslastung der Maschinen zentrale Messgrößen, die es zu maximieren gilt. Es soll eine kontinuierliche Darstellung des Kapazitätsprofils der Linie geschaffen werden. Hierfür wird ein Vergleich zwischen definierten Kundentakt und den aktuellen Zykluszeiten angestrebt. Zusätzlich ist die Betrachtung der Overall Equipment Effectiveness (OEE) von Bedeutung. Hierzu werden der Verfügbarkeitsgrad, der Leistungsgrad sowie der Qualitätsgrad je Prozessschritt als einzelne Kennzahlen bestimmt und ausgegeben. Die anschließende *Datenaufnahme* zeigt, dass die notwendigen Datenpunkte in zwei Protokollen des MES gespeichert werden und die für die Berechnung des Kundentakts benötigten Plandaten einer Transaktion des ERP-Systems entnommen werden können. Eine Datenbedarfsmatrix muss daher an dieser Stelle nicht erstellt werden. Ebenso müssen keine zusätzlichen Datenpunkte erfasst werden, sodass mit der Implementierung der virtuellen Ebene fortgefahren werden kann.

#### Gestaltungsdimension 2: Virtuelle Ebene

Die *historische Datenspeicherung* ist bereits prozessschrittspezifisch im MES implementiert, sodass für jede Schicht die notwendigen Daten erfasst werden. Die Speicherorte sind eindeutig benannt und es sind eindeutige Zeitstempel vorhanden, sodass die eindeutige Datenzuordnung gewährleistet ist. Aufgrund der Limitierung des MES-Datenexports auf



einen Excelreport werden die Rohdaten zunächst auf einem lokalen Server zwischengespeichert, bevor die Kennzahlen berechnet werden. Eine zusätzliche *Modellierung* der Daten ist nicht notwendig, da sie bereits in den entsprechenden Tabellen gespeichert werden und die Zusammenhänge direkt aus den Systemen abgeleitet werden können. Im Rahmen der *Datenverarbeitung* werden die notwendigen Kennzahlen für jeden Prozessschritt berechnet und in einer Auswertungsdatei gespeichert. Diese wird ebenfalls auf dem lokalen Server historisiert. Zur Berechnung der Kennzahlen werden die in Anhang A.11 dokumentierten Formeln verwendet. Abbildung 52 zeigt den konzeptionellen Aufbau der virtuellen Ebene.

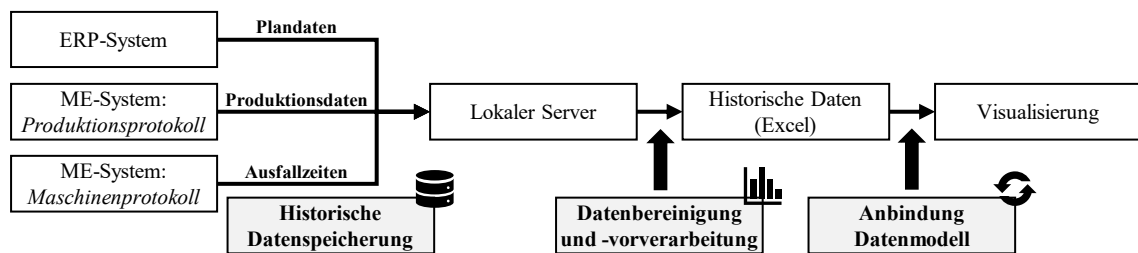


Abbildung 52: Gestaltungselemente 2.1-2.3 – Umsetzung virtuelle Ebene

### Gestaltungsdimension 3: Verbindungsebene

Im Rahmen der dritten Gestaltungsebene wird die Verbindung zwischen der physischen und der virtuellen Ebene implementiert. Die *Schnittstelle physisch/virtuell* wird durch die bereits beschriebene Verbindung zwischen den IT-Systemen und dem lokalen Server hergestellt. Da die IT-Systeme lediglich Excel-Exporte ermöglichen, ist weder die Auswahl einer Kommunikationstechnologie noch eines -standards notwendig. Der Fokus wurde daher auf die Ausgestaltung der *Schnittstelle virtuell/physisch* gelegt. Ziel war es, eine passende Softwarelösung für das Unternehmen zu finden, die sich für das digitale Abbild des Wertstroms eignet. Hierzu wurden im ersten Schritt gemeinsam im Projektteam *Anforderungen an die Softwarelösung* formuliert. Auf diese Weise wurden zwölf funktionale, nicht-funktionale Anforderungen und Randbedingungen bestimmt. Anschließend wurden diese mithilfe des Paarvergleichs bewertet und gewichtet. Nach der Priorisierung der Anforderungen wurde die *Identifikation potenzieller Softwarelösungen* forciert. Im Rahmen einer Marktrecherche wurden sechs Softwarelösungen identifiziert, die auf ihre Eignung zur Erfüllung der Anforderungen getestet wurden: *Microsoft Visio*, *Microsoft PowerBI*, *SIMVSM*, *LucidChart*, *EdrawMax* und *ConceptDraw Diagram*. Um die Eignung der Softwarelösungen zu bewerten, wurden quantitative Bewertungsskalen für die Anforderungen festgelegt. Die anschließende Bewertung zeigt, dass die Software *Microsoft Visio* (MS Visio) alle funktionalen Anforderungen erfüllt. Über eine automatisierte Datenaktualisierung wird der Aktualisierungsaufwand reduziert. Darüber hinaus ist die Software bereits im Unternehmen vorhanden, sodass keine zusätzlichen Kosten anfallen und die Software auch für weitere Anwendungen genutzt werden kann. Insgesamt wird MS Visio für den Anwendungsfall als geeignetes Tool identifiziert und für die Umsetzung

des digitalen Wertstromabbildes verwendet. Weiterführende Informationen bezüglich des Auswahlprozesses sind in Anhang A.11 dokumentiert.

### Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings

Die Implementierung des digitalen Wertstromabbildes wurde manuell durchgeführt. Hierbei ist es wichtig, dass die Benennung der Prozesskästen identisch zur Prozessschritt-Benennung in der historischen Excel-Datei ist. Dadurch können die Daten automatisch beim Import der Excel-Datei in MS Visio mit den jeweiligen Kästen verknüpft werden. Zur Visualisierung der Abweichungen einzelner Prozessschritte vom Kundentakt, wurden die Prozessschritte farblich gekennzeichnet, um einen schnellen Überblick über das Kapazitätsprofil des Wertstroms zu erlangen (hellgrau = keine Abweichung, dunkelgrau = Abweichung). Nachdem der Wertstrom in MS Visio implementiert und die Datenanbindung hergestellt wurde, war der Digitale Wertstromzwilling für seinen Einsatz zum *Monitoring des Wertstroms* bereit. Abbildung 53 zeigt die Unterschiede, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Wertstrom festgestellt werden konnten.

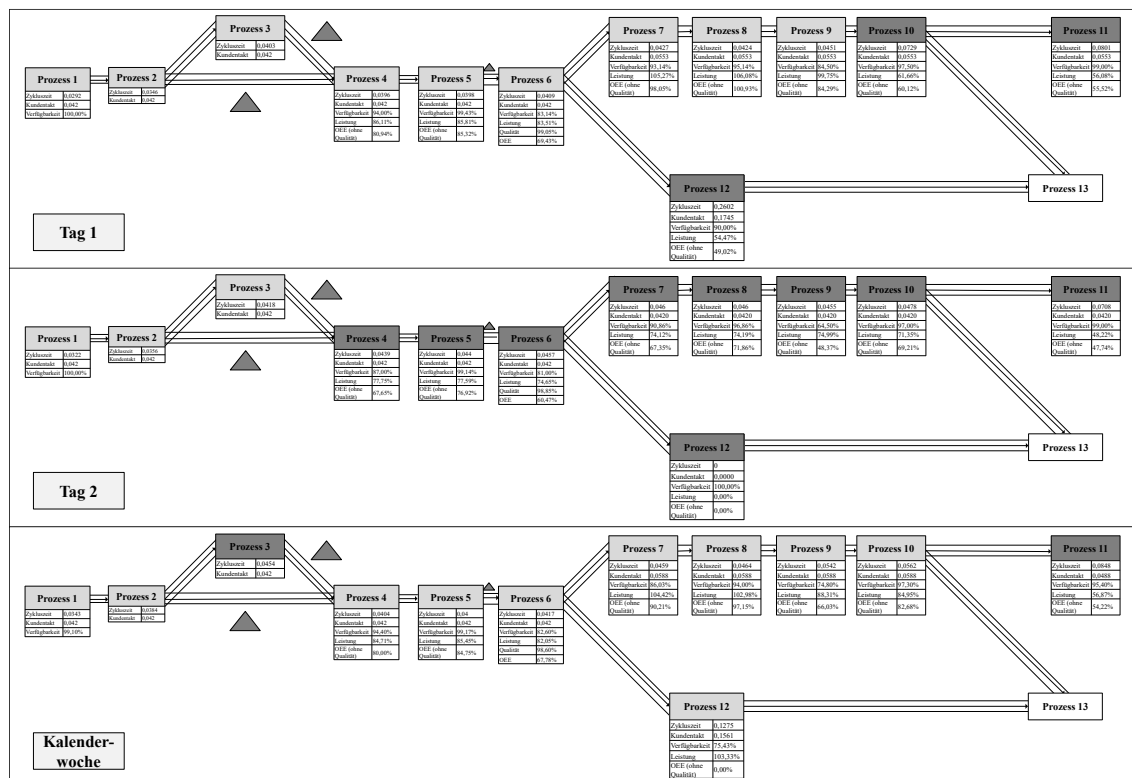


Abbildung 53: Vergleich zwischen zwei Produktionstagen und der Kalenderwoche<sup>18</sup>

Es sind zwei Produktionstage aus einer Produktionswoche dargestellt, die ein grundlegend unterschiedliches Bild zeigen. Während am ersten Tag die Leistung überwiegend unterhalb des Kundentakts liegt, werden am zweiten Tag deutliche Abweichungen über

<sup>18</sup> Aufgrund der Datenschutzrichtlinien des Unternehmens ist eine Veröffentlichung der zugrundeliegenden Rohdaten nicht gestattet, da diese Informationen das Kerngeschäft des Unternehmens offenlegen und daher streng vertraulich behandelt werden müssen.

den Abschnitt Verpackung (Prozess 4 bis Prozess 10) deutlich. Betrachtet man hingegen die Daten einer Kalenderwoche, so weist der dritte Prozessschritt Abweichungen auf, die in den täglichen Analysen nicht identifiziert werden konnten. Dies unterstreicht die Wichtigkeit der kontinuierlichen Betrachtung des Wertstroms, insbesondere in der Prozessindustrie, um auf Unregelmäßigkeiten zeitnah reagieren zu können. Die kontinuierliche Überwachung ermöglicht nicht nur die frühzeitige Erkennung und Reaktion auf Abweichungen, sondern stellt auch zielgerichtete Verbesserung des Wertstroms sicher. Im Vergleich zur statischen Wertstromanalyse, bietet der Digitale Wertstromzwilling ein dynamisches und kontinuierliches Monitoring der Wertstromleistung. Dadurch ist es möglich, Veränderungen und Trends in der Leistung des Wertstroms über die Zeit zu erkennen und nicht nur punktuelle Probleme zu identifizieren.

### 7.1.3 Anwendung der Methode in einer standardisierten Laborumgebung

Als standardisierte Laborumgebung zur Anwendung der entwickelten Methode dienen drei Lernfabriken des PTWs an der TU Darmstadt. Eine Lernfabrik stellt eine physische Lernumgebung dar, die einer realen Produktion nachempfunden ist. Charakteristisch hierbei ist das Lernen vor Ort in einer realitätsnahen Produktionsumgebung, ein physisches Produkt sowie eine reale Ausstattung des Umfelds. [ABEL24] Die folgenden Ausführungen sind im Rahmen eines Forschungsprojektes entstanden, in dem ein Lernfabrikenübergreifender Wertstrom implementiert wurde, um die informationslogistische Vernetzung zwischen mehreren Standorten abbilden zu können.<sup>19</sup> Die Ergebnisse sind im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit erarbeitet und in [FRIC24f, FRIC24d] bereits veröffentlicht.

#### 7.1.3.1 Methodenbaustein 1: Gestaltung physische Ebene

Im Folgenden wird die Anwendung des ersten Methodenbausteins erläutert.

##### **Methodenschritt 1.1: Definition Wertstrom**

Für die Definition des Wertstroms wurde zunächst die Produktfamilie bestimmt und anschließend die Systemgrenzen definiert. Die *Produktfamilie* ist ein Modul, das aus einer Grundplatte und darauf montierten Stifthaltern besteht. Insgesamt lassen sich 28 unterschiedliche Varianten unterscheiden (vgl. Anhang A.12). Die *Systemgrenzen* des Wertstroms bestehen aus der Betrachtung zweier Standorte mit unterschiedlichen IT-Systemen sowie unterschiedlichen Prozessschritten innerhalb der Standorte mit variierendem Digitalisierungsgrad. Eine Darstellung des Wertstroms bietet Abbildung 54.

---

<sup>19</sup> Der Wertstrom ist im Rahmen des Forschungsprojektes „Modellbasierte Digitalisierung nachhaltiger Produktionsnetzwerke entlang des Produktlebenszyklus (DiNaPro)“ implementiert worden.

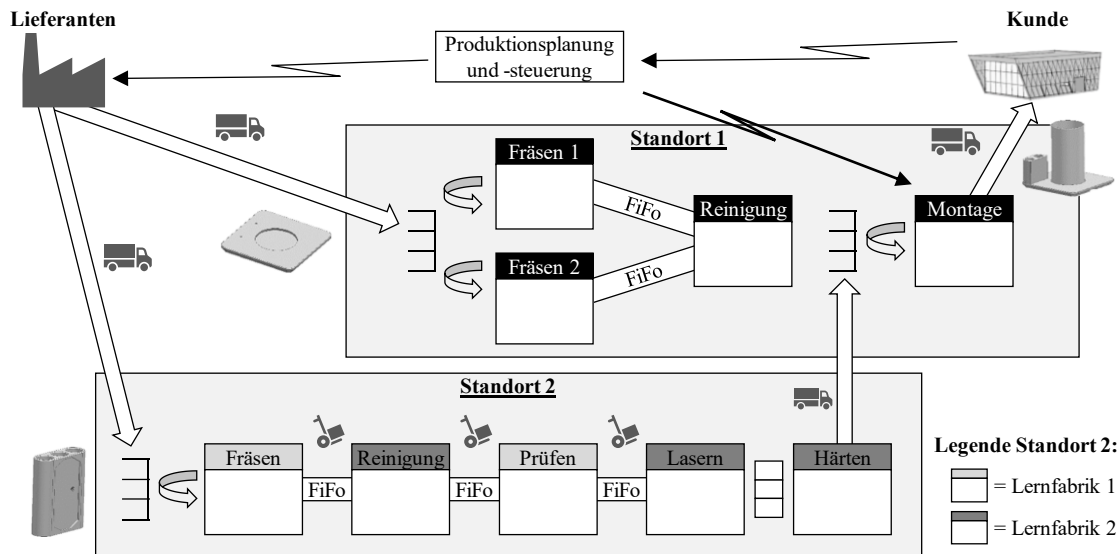


Abbildung 54: Wertstrom standardisierte Laborumgebung

### Methodenschritt 1.2: Definition des Anwendungsfalls im Wertstrommanagement

Um einen reibungslosen Ablauf des neu implementierten Wertstroms sicherzustellen, ist insbesondere die *kurz- und mittelfristige Perspektive* des Wertstrommanagements relevant. Daher wurde beschlossen, die Anwendungsfälle *Monitoring des Wertstroms* sowie die *Initiierung von Verbesserungsprojekten* zu berücksichtigen. Hieraus ergibt sich im Folgenden der notwendige Datenbedarf für die Anwendungsfälle.

### Methodenschritt 1.3: Ableitung des Datenbedarfs

Für die kurz- und mittelfristigen Aufgaben des Wertstrommanagements sind nach Abschnitt 4.3 Daten aus den Kategorien *Qualität, Produkt, Prozess, Kunden, Lieferanten, Personal* erforderlich. In der standardisierten Laborumgebung werden keine Informationen zu den letzten drei Bereichen benötigt, da in dieser Umgebung keine Ausfälle in diesen Bereichen zu erwarten sind. Im Bereich *Qualität* werden die *Ausschussrate* und der *Ausschussgrund* für jeden Prozessschritt als wichtige Kennzahlen definiert. Im Bereich *Produkt* sind die *Bearbeitungszeit, Losgröße, Zykluszeit* je Prozessschritt sowie die *Liegezeiten* und *Durchlaufzeit* relevante Kennzahlen, während im Bereich des *Prozesses* die *Bestände* und der *Engpass* von Bedeutung sind. Der sich hieraus ergebende Datenbedarf ist in Tabelle 38 bis Tabelle 40 für Standort 1 (vgl. Anhang A.12) dargestellt.

### Methodenschritt 1.4: Definition der expliziten Datenpunkte

Bei der Definition der expliziten Datenpunkte zeigte sich, dass die notwendigen Daten in *keinen bestehenden IT-Systemen* vorliegen und diese daher im Rahmen der *multimodalen Datenaufnahme* neu erfasst werden müssen. Dabei wird zwischen der *Kalkulation* der Kennzahlen, der Aufnahme mithilfe eines *Traceability-Systems* sowie dem *Input auf einer IoT-Plattform* unterschieden. Die Zuordnung zu den jeweiligen Prozessschritten und -verbindungen ist in Tabelle 38 bis Tabelle 40 für Standort 1 (vgl. Anhang A.12) exemplarisch dargestellt.

### **Methodenschritt 1.5: Implementierung fehlender Datenpunkte**

Um die Datenpunkte im Wertstrom erzeugen zu können, wurde im Anschluss ein *Traceability-System* auf Basis der AutoID-Technologie implementiert. Dieses ermöglicht die An- und Abmeldung der Bauteile an den jeweiligen Prozessschritten. Zu diesem Zweck wurde jedes Bauteil mit einem NFC-Tag versehen, der eine eindeutige Kennung enthält, sodass jedes Bauteil an jedem Prozessschritt identifiziert werden kann. Zusätzlich wurde eine IoT-Plattform implementiert, auf der sowohl das Traceability-System als auch die Ausschussmeldungen umgesetzt wurden. Die Berechnung der weiteren Kennzahlen erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt. In dieser Phase wurde lediglich sichergestellt, dass die notwendigen Datenpunkte im Wertstrom erzeugt werden.

#### *7.1.3.2 Methodenbaustein 2: Gestaltung virtuelle Ebene*

Nach der Gestaltung der physischen Ebene wird im Folgenden auf die Anwendung des zweiten Methodenbausteins eingegangen. Dabei werden parallele Methodenschritte simultan beschrieben.

### **Methodenschritte 2.1 und 2.2: Implementierung der Schnittstelle physisch/virtuell und Umsetzung der historischen Datenspeicherung**

Für die Implementierung der Schnittstelle physisch/virtuell sind die Kommunikationstechnologie und der -standard zu definieren. Für die *Kommunikationstechnologie* wurde auf die in den Lernfabriken etablierte TCP/IP-Verbindung zurückgegriffen. Diese ist für den Anwendungsfall ausreichend, da die *Erfassungsart* der Zeitstempel *teilautomatisiert* mithilfe von NFC-Readern erfolgt. Diese wurden an jedem Prozessschritt an ein Tablet angeschlossen und die Informationen über eine Industrial Ethernet-Verbindung an die IoT-Plattform gesendet. Eine *eindeutige Speicherposition* ist dadurch gewährleistet, dass die NFC-Reader eindeutig den Prozessschritten zugeordnet wurden und auf diese Weise die erzeugten Daten der Reader eindeutig den jeweiligen Prozessschritten zugewiesen werden.

Für die historische Datenspeicherung müssen *eindeutige Zeitstempel* verfügbar sein. Hierfür wurde die *Verfolgungsgranularität* entlang des Wertstroms auf jedes *individuelle Bauteil* festgelegt und die *Erfassungsdichte* auf den *Start- und Endpunkt je Prozessschritt* festgesetzt, sodass eine maximale Datengranularität gewährleistet ist.

### **Methodenschritt 2.3: Entwurf konzeptionelles Datenmodell**

Basierend auf den Kennzahlen des Anwendungsfalls ergeben sich drei grundlegende *Entitäten*, die bei der Entwicklung des Datenmodells berücksichtigt wurden: Die *Prozesse*, die *Bauteile* und die *Varianten*. Ein Bauteil durchläuft dabei mehrere Prozessschritte (1:n) und ist einer spezifischen Variante (1:1) zugeordnet. Um die Prozesse eindeutig zuordnen zu können, erfolgte eine *Spezialisierung*, indem zusätzliche Informationen über den Standort sowie den Maschinentyp je Prozessschritt ergänzt wurden. Gleiches gilt für die Varianteninformationen, welche in *Grundplatten* und *Stifthalter* unterteilt werden, da diesen Kategorien unterschiedliche *Attribute* zugeordnet werden. Die Verknüpfung der

Informationen erfolgt über ein *Bauteil-Log*, in dem die An- und Abmeldeinformationen der Bauteile für jeden Prozessschritt gespeichert wurden. Das Ergebnis des konzeptionellen Datenmodells ist in Abbildung 55 dargestellt.

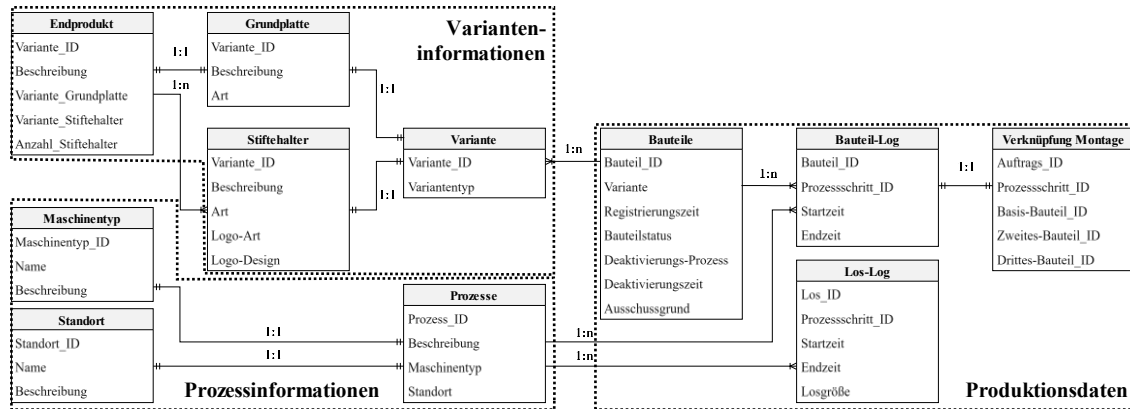


Abbildung 55: Konzeptionelles Datenmodell

### Methodenschritt 2.4: Transformation in logisches Datenmodell

Für die Transformation in ein logisches Datenmodell wurden die *Primärschlüssel* jeder Entität sowie die notwendigen *Fremdschlüssel* zur Verknüpfung der Entitäten festgelegt. Die *Datentypen der Attribute* wurden mithilfe der *Übersicht über Datentypen* in Anhang A.5 bestimmt. Dabei wurde je nach Länge des Eintrags unterschiedliche Zeichenketten, numerische Datentypen und Zeitstempel im *datetime*-Format verwendet. Durch die *Normalisierung* des Datenmodells wurden bspw. die Prozessinformationen in die Tabellen *Prozesse*, *Maschinentyp* und *Standort* unterteilt, sodass eine verschwendungsarme Datenverwaltung gewährleistet wird. Abbildung 56 zeigt das Ergebnis der Transformation.

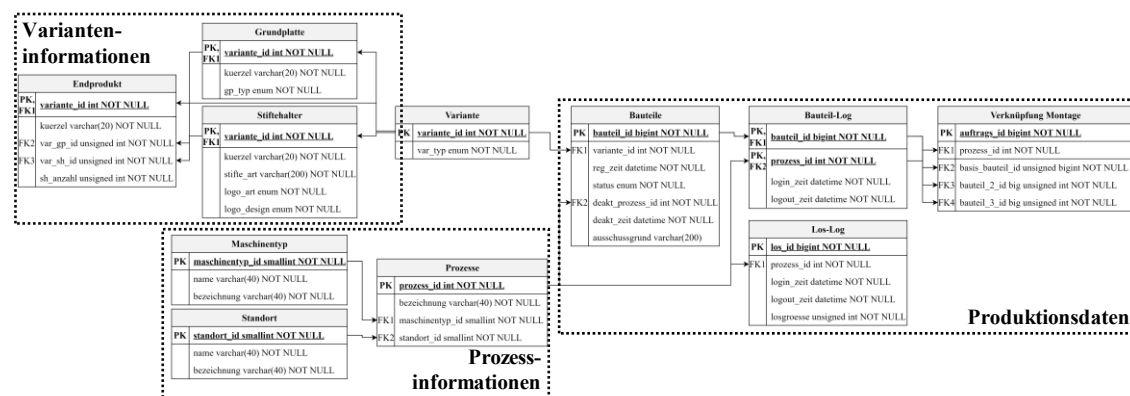


Abbildung 56: Logisches Datenmodell

### Methodenschritt 2.5: Auswahl Datenbankmanagementsystem

Für die Auswahl des Datenbankmanagementsystems wurde auf die *Übersicht über Datenbanktypen* in Anhang A.7 und die Leitfragen aus Abschnitt 6.2.2 zurückgegriffen. Im vorliegenden Fall war die Nutzung einer *relationalen Datenbank* ausreichend, da *keine unterschiedlichen Datentypen* vorliegen, *keine Erweiterung der Datenbank* geplant ist

und *keine spezifischen Kommunikationsprotokolle* unterstützt werden mussten. Für die praktische Umsetzung wurde eine *MySQL-Datenbank* implementiert, da diese universell anwendbar ist und einen umfangreichen öffentlichen Support bietet.

### **Methodenschritte 2.6 und 2.7: Integration der Datenbereinigung und -vorverarbeitung und Umsetzung physisches Datenmodell**

Die *Datenbereinigung und -vorverarbeitung* sind in der Analyse und Bewertung des Wertstroms elementar. Zu diesem Zweck wurde ein *Python-Skript* entwickelt, das relevante Kennzahlen aus dem Bauteil-Log und Los-Log automatisch extrahiert und berechnet. Dabei werden *prozessspezifische Bearbeitungszeiten* durch die Differenz zwischen Start- und Endzeitpunkten ermittelt. Die *Zykluszeit* resultiert aus der Division der *Bearbeitungszeit* durch die *Losgröße*, während die *Ausschussrate* durch das Verhältnis der Ausschussteile zur Gesamtproduktionsmenge eines Betrachtungszeitraums am jeweiligen Prozessschritt bestimmt wird. Eine *flexible Granularität* der Datenanalyse wird durch individuelle Filteroptionen für den Zeitraum ermöglicht. Die Skripte laufen im Hintergrund, um neue Daten in den Datenbanktabellen zu identifizieren und zu verarbeiten.

Die *Umsetzung des physischen Datenmodells* erfolgte auf einem lokalen Server, wobei die Strukturierung der Datenbank mittels SQL realisiert wurde. Dieser Prozess umfasste die Überführung der in Abbildung 56 definierten Entitäten und deren Attribute in Datenbanktabellen. Dabei wurden Datentypen zugewiesen sowie Primär- und Fremdschlüssel definiert. Die Integration der IoT-Plattform sowie die kontinuierliche Datenabfrage und Berechnung der Kennzahlen wurden durch dauerhaft laufende Python-Skripte realisiert. Diese stellten auch die Datenbereitstellung für die Visualisierungslösung sicher. An dieser Stelle ist die Implementierung der virtuellen Ebene abgeschlossen und das System ist in der Lage, den Wertstrom vollständig digital abzubilden<sup>20</sup>.

#### *7.1.3.3 Methodenbaustein 3: Gestaltung Verbindungsebene*

Der letzte Schritt der technischen Implementierung ist die Gestaltung der Verbindungsebene. Hierauf wird nachstehend eingegangen.

### **Methodenschritt 3.1: Durchführung Daten- und Zeitreihenanalyse**

Ziel der *Daten- und Zeitreihenanalyse* ist die Identifikation von Anomalien in den Prozessdaten, die auf instabile Prozesse oder fehlerhafte Rückmeldungen zurückzuführen sind. Aufgrund der standardisierten Laborumgebung und des qualifizierten Personals können Anomalien aufgrund fehlerhaften Verhaltens ausgeschlossen werden. Daher ist der Methodenschritt im vorliegenden Anwendungsfall nicht relevant.

---

<sup>20</sup> Weiterführende Informationen finden sich in [FRIC24c].

### **Methodenschritt 3.2: Definition und Gewichtung der Anforderungen an die Softwarelösung**

Der im Folgenden beschriebene Auswahlprozess einer Softwarelösung für den Anwendungsfall wurde durch eine Masterarbeit begleitet und erfolgte in enger Abstimmung mit dem Autor der vorliegenden Forschungsarbeit [NEUM24]. Die durch das Projektteam definierten Anforderungen sind in die Kategorien Randbedingungen, Visualisierung, Datenmanagement und Funktionalität unterteilbar, woraus sich insgesamt zwölf Anforderungen ableiten lassen. Eine Dokumentation der Anforderungen inklusive Erläuterung findet sich in Tabelle 41 in Anhang A.12. Für die systematische Gewichtung der Anforderungen wird der Paarvergleich verwendet. Als Stakeholder für die Gewichtung werden die Projektmitarbeiter:innen verwendet. Diese weisen sowohl Kenntnisse bei der Anwendung der Wertstrommethode auf als auch Expertise in der Digitalisierung der Produktion. Das Ergebnis der Gewichtung findet sich in Tabelle 42 in Anhang A.12.

### **Methodenschritt 3.3: Selektion der Softwarelösung**

Für die Identifikation der Softwarelösungen wurde eine *systematische Marktrecherche* durchgeführt. Ausgangspunkt für die Analyse war die in Anhang A.8 dargestellte *Übersicht existierender Softwarelösungen für die Darstellung eines Wertstroms*. Auf diese Weise wurden die fünf Softwarelösungen *MS Visio*, *IQA*, *LucidChart*, *PolarisVSM* und *Leanion* ausgewählt, da diese aufgrund der Erfahrungen des Autors der vorliegenden Forschungsarbeit die umfangreichsten Funktionen besitzen. Hierfür wurde zunächst in eine Quantifizierung der Bewertungskriterien vorgenommen. Die Kategorien der Bewertungskriterien sind in Tabelle 43 in Anhang A.12 aufgeführt. Im Rahmen der Anforderungsdefinition wurde das Ausschlusskriterium *Adaptierbarkeit an zusätzliche Anwendungsfälle* definiert, um die Nutzung für weitere Anwendungsfälle, wie eine bauteilindividuelle CO<sub>2</sub>-Bilanzierung<sup>21</sup>, unmittelbar zu berücksichtigen. Da diese Anforderung durch keine der Softwarelösungen erfüllt werden konnte, wurde entschieden, eine eigene Softwarelösung für die standardisierte Laborumgebung zu entwickeln. Dadurch wird die Adaptierbarkeit an weitere Anwendungsfälle sichergestellt. Die Umsetzung erfolgte im Anschluss in Zusammenarbeit mit IT-Expert:innen im Rahmen der Projektarbeit.

### **Methodenschritt 3.4: Anbindung physisches Datenmodell**

Die Anbindung des physischen Datenmodells erfolgte über *individuelle REST API-Schnittstellen*. Diese ermöglichen die Live-Anbindung der An- und Abmeldezeitstempel je Prozessschritt, die mithilfe der IoT-Plattform erzeugt wurden, sowie den Abruf der Ausschussgründe. Die Daten werden in den Tabellen *Bauteile*, *Bauteil-Log*, *Los-Log* und *Verknüpfung Montage* gespeichert (vgl. Methodenschritt 2.4). Andererseits werden die gespeicherten Daten daraufhin verarbeitet (vgl. Methodenschritt 2.6) und über eine weitere REST API-Schnittstelle der entwickelten Web-Applikation zur Verfügung gestellt.

---

<sup>21</sup> Hierbei handelt es sich um ein explizites Projektziel des Forschungsprojektes „Modellbasierte Digitalisierung nachhaltiger Produktionsnetzwerke entlang des Produktlebenszyklus (DiNaPro)“, sodass dieses zwingend zu erfüllen ist.



### Methodenschritt 3.5: Visualisierung des Wertstroms

Die Visualisierung erfolgte mithilfe der eigens entwickelten Web-Applikation. Neben der Wertstromdarstellung wurden weitere Darstellungen über die bauteilindividuelle CO<sub>2</sub>-Bilanzierung integriert. Für die vorliegende Forschungsarbeit ist allerdings nur die dargestellte *Gesamtübersicht des Wertstroms* mit Durchschnittswerten für den ausgewählten Betrachtungszeitraum relevant, wie in Abbildung 57 dargestellt.

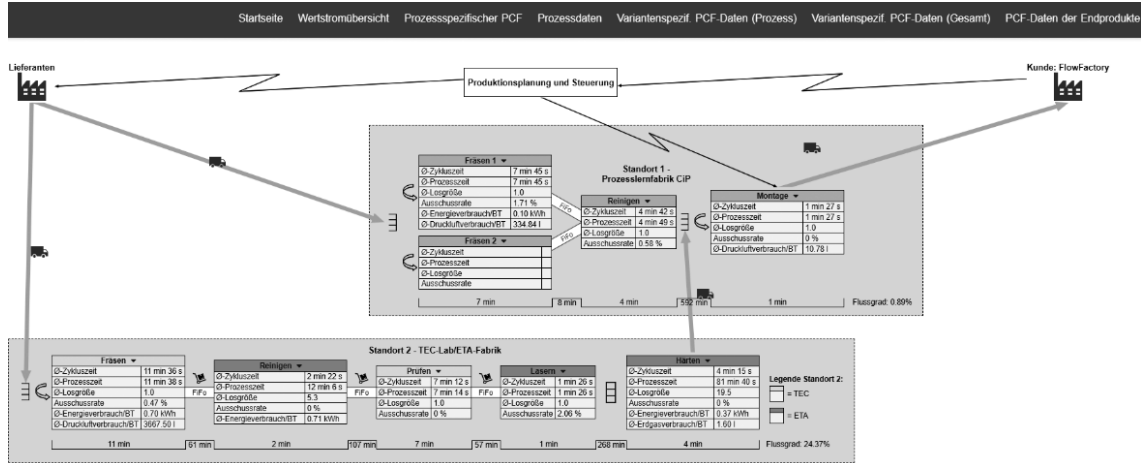


Abbildung 57: Gesamtübersicht des Wertstroms nach [FRIC24c]

Das digitale Wertstromabbild bietet eine transparente Übersicht über die aktuelle Leistung des Wertstroms und beinhaltet den im Rahmen des Anwendungsfalls (vgl. Methodenschritt 1.3) definierten Datenbedarf. Sind weiterführende Analysen notwendig, kann über einen Klick auf den Prozessschritt die *Detailseite eines Prozessschrittes* aufgerufen werden (Abbildung 58).



Abbildung 58: Detailseite eines Prozessschrittes nach [FRIC24c]

Diese Darstellung bietet Filtermöglichkeiten – Betrachtungszeitraum und Produktvariante – im linken Drittel. Außerdem werden der historische Verlauf der Zykluszeiten, die Variantenverteilung als Maß für die Flexibilität des Prozesses, ein Histogramm über die Streuung der Zykluszeiten sowie die Liste der Ausschussteile inklusive der Ausschussgründe dargestellt. Durch diese Darstellungen ermöglicht die entwickelte Softwarelösung eine umfassende Transparenz über den aktuellen Zustand des Wertstroms und ist somit für den Einsatz im Wertstrommanagement geeignet.

#### 7.1.3.4 Methodenbaustein 4: Anwendung im Wertstrommanagement

Zur Überprüfung der Wirksamkeit der Anwendung im Wertstrommanagement, wurden im Rahmen des Projektes zwei Testwochen durchgeführt. In der ersten Testwoche wurde mithilfe der initialen Datenaufnahme ein digitales Abbild des Wertstroms erzeugt. Im Anschluss an die erste Testwoche wurden die Methodenschritte 4.1-4.3 durchgeführt. Die abschließende Überprüfung der Wirksamkeit der getroffenen Anpassungen (Methodenschritt 4.4) erfolgte während der zweiten Testwoche<sup>22</sup>.

#### Methodenschritt 4.1: Analyse und Bewertung

Durch die *Analyse und Bewertung* der Leistung des Wertstroms wurde überprüft, ob es Abweichungen vom Soll-Zustand an den Prozessschritten gab. Aus den identifizierten Abweichungen ließen sich die folgenden Verbesserungspotenziale ableiten:

- Prozessschritt Fräsen Standort 2: Es zeigte sich, dass der Prozessschritt mit einer *durchschnittlichen Zykluszeit* von 11:36 Minuten signifikant vom definierten Kundentakt von 8:07 Minuten abweicht und somit den Engpassprozess darstellt. Dies ist auf die variantenabhängige Bearbeitungsdauer zurückzuführen, da die Varianten mit einem gravierten Logo im Durchschnitt 13:38 Minuten benötigen. Um die Gesamtleistung des Wertstroms erhöhen zu können und in Zukunft den Kundentakt einhalten zu können, ist eine Verbesserung des Fertigungsprogramms am Prozessschritt Fräsen Standort 2 unabdingbar.
- Prozessschritt Lasern Standort 2: Die Analyse der *Ausschussrate* zeigt, dass am Laserprozess mit 2,06% die höchste Ausschussquote vorliegt. Die Analyse des Prozesses zeigt, dass die Qualität der gelaserten Bauteile von der gelaserten Variante abhängt. Daher wird angestrebt, das Laserprogramm der entsprechenden Variante gezielt zu verbessern.

#### Methodenschritt 4.2 und 4.3: Entscheidungsfindung und Implementierung der Verbesserungsmaßnahmen

Im Rahmen der *Entscheidungsfindung* wurden vom Projektteam die notwendigen Maßnahmen zur Verbesserung der Leistung des Wertstroms definiert. Hierzu wurde festgelegt, dass die zwei identifizierten Verbesserungspotenziale bis zur zweiten Testwoche umgesetzt sein müssen, damit die Wirksamkeit der Maßnahmen datenbasiert überprüft

---

<sup>22</sup> Weiterführende Informationen zu den Testwochen sowie die Rohdaten finden sich in [FRIC24b].

werden kann. Die anschließende *Implementierung der Verbesserungsmaßnahmen* sah eine Reduktion der Bearbeitungszeit am Prozessschritt Fräsen und eine Anpassung der Laserparameter am Prozessschritt Lasern vor. Die Anpassungen wurden durch das Fachpersonal des Instituts vorgenommen.

#### **Methodenschritt 4.4: Monitoring der Anpassungen**

Das *Monitoring der Anpassungen* erfolgte während der zweiten Testwoche. Ziel war es, die Wirksamkeit des Digitalen Wertstromzwillings zu demonstrieren. Hierfür wurde überprüft, ob die Verbesserungsmaßnahmen ihre Wirksamkeit in den neu aufgenommenen Daten zeigten. Auf die Ergebnisse wird im Folgenden eingegangen:

1. Prozessschritt Fräsen Standort 2: Die Daten zeigen, dass die durchschnittliche Zykluszeit *um 38% auf 7:06 Minuten reduziert* werden konnte, sodass der Kundentakt von 8:07 Minuten am Engpassprozess während der zweiten Testwoche eingehalten werden konnte.
2. Prozessschritt Lasern Standort 2: Die Anpassung der Laserparameter führte dazu, dass im Rahmen der zweiten Testwoche *kein Ausschuss* am Laserprozess anfiel und die Verbesserungsmaßnahme somit ihre Wirkung zeigte. Zeitgleich zeigen die Daten jedoch auch, dass mit der Anpassung der Parameter eine *Steigerung der Zykluszeit um 88%* verbunden war. Eine negative Auswirkung auf die Gesamtleistung des Wertstroms liegt allerdings nicht vor, da die durchschnittliche Zykluszeit mit 2:31 Minuten deutlich unter dem geforderten Kundentakt liegt.

Die Anwendung des Digitalen Wertstromzwillings in der standardisierten Laborumgebung bestätigt, dass die Entscheidungsfindung im Wertstrommanagement gezielt unterstützt wird. Da belastbare Kennzahlen bereitgestellt werden, ist eine umfassende Analyse der Produktionsprozesse und die Identifikation von Verbesserungspotenzialen möglich. In diesem Kontext erlaubt die kontinuierliche Datenaufnahme die Überprüfung der Wirksamkeit der Anpassungen. Darüber hinaus bietet das implementierte Datenmodell die Grundlage für die Erweiterung um zusätzliche Kennzahlen, wie beispielsweise die Ressourceneffizienz. Durch die Integration von Daten aus unterschiedlichen Quellen ist die Sicht auf individuelle Prozesse in die ganzheitliche Betrachtung des gesamten Wertstroms integriert. Die Flexibilität in der Datenerfassung und -analyse erlaubt es Wertstrommanager:innen, strategische und datenbasierte Entscheidungen zu treffen und dadurch die Produktionseffizienz kontinuierlich zu verbessern. Insgesamt trägt der Digitale Wertstromzwilling somit zu einer Erhöhung der Transparenz im Wertstrommanagement bei, wodurch eine effektive Steuerung langfristiger Verbesserungsmaßnahmen ermöglicht wird.

## **7.2 Evaluation**

Die abschließende Evaluation des entwickelten Gestaltungsmodells (GM) und der Methode erfolgt anhand der in den Abschnitten 3.2 und 5.1.1 definierten formalen und inhaltlichen Anforderungen. Hierzu wird ein *strukturierter Fragebogen* verwendet (vgl.

Anhang A.13), mit dem sowohl die Anwender:innen des Gestaltungsmodells und der Methode als auch Expert:innen aus den Bereichen Wertstrommanagement und Digitalisierung befragt werden. Die Erfüllung der Anforderungen wird mit einer fünfstufigen Likert-Skala von -2 („stimme überhaupt nicht zu“) bis 2 („stimme voll und ganz zu“) bewertet. Die Ergebnisse der Evaluation sind in Abbildung 59 dargestellt.

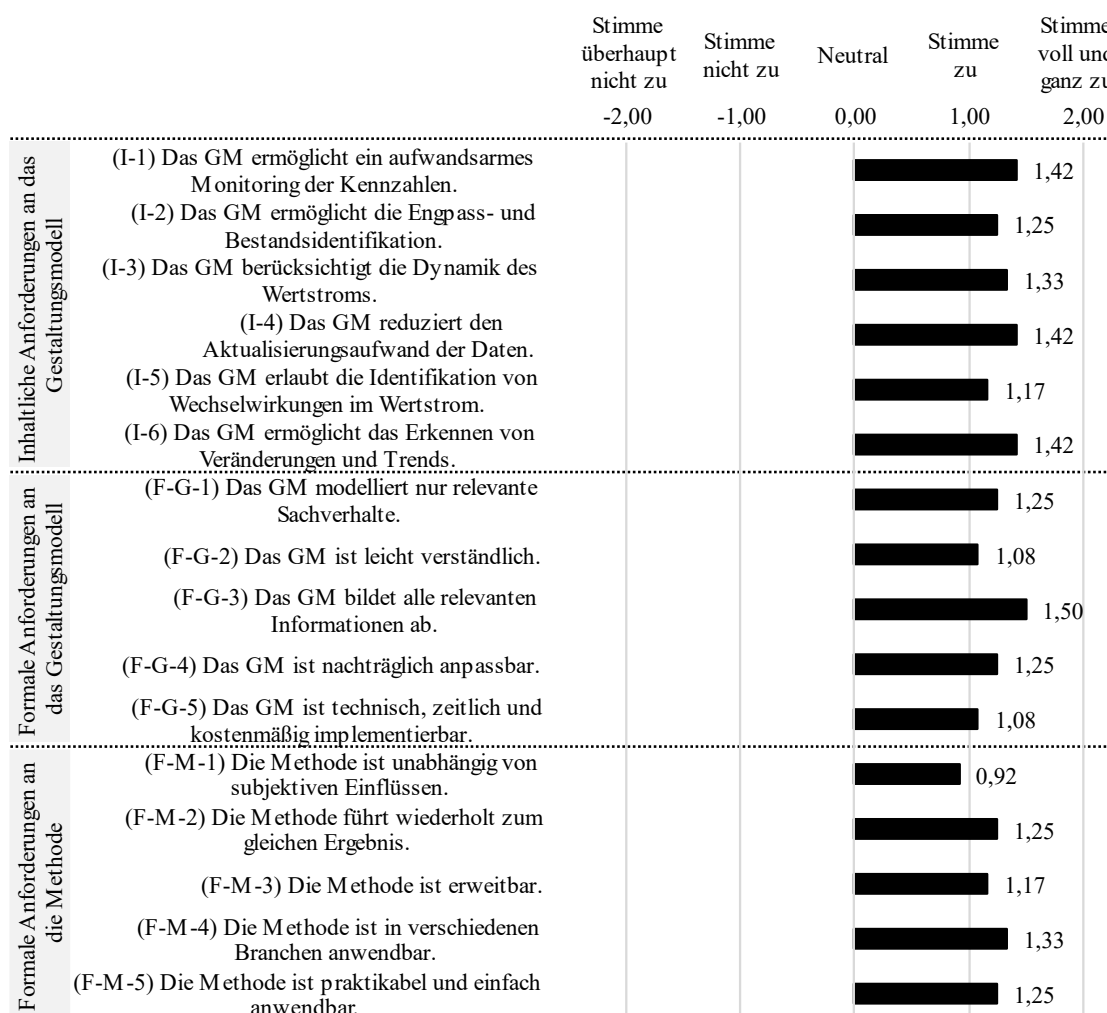


Abbildung 59: Ergebnis der Evaluation der Anforderungen (n=12) nach [FRIC24a]

Da die Anforderungen aus dem Bereich des Digitalen Zwillings bereits bei der Entwicklung des Gestaltungsmodells explizit berücksichtigt worden sind (vgl. Abschnitt 5.2), werden diese mithilfe einer *analytischen Argumentation* hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen bewertet.

### Bewertung der inhaltlichen Anforderungen an das Gestaltungsmodell

Nachstehend wird auf die Ergebnisse der Bewertung der inhaltlichen Anforderungen an das Gestaltungsmodell (I-1 bis I-6) eingegangen. Alle Anforderungen wurden zwischen 1 („stimme zu“) und 2 („stimme voll und ganz zu“) bewertet und gelten daher als erfüllt:

- (I-1): Das Gestaltungsmodell fokussiert die Darstellung zentraler Wertstromkennzahlen in Form eines digitalen Abbildes des Wertstroms. Die Expert:innen bewerten die *Ermöglichung eines aufwandsarmen Monitorings der Kennzahlen* im Mittel mit 1,42. Die Anforderung gilt somit als erfüllt.
- (I-2): Die *Identifikation des Engpasses und der Bestände* ist Teil der kurzfristigen Planung des Wertstrommanagements und daher im Gestaltungsmodell implizit berücksichtigt. Die Expert:innen bewerten die Anforderungserfüllung mit 1,25 im Mittel, sodass die Anforderung als erfüllt betrachtet wird.
- (I-3): Durch die Historisierung der Daten wird eine Zeitreihen- und Trendanalyse ermöglicht. Auf diese Weise wird die *Berücksichtigung der Dynamik des Wertstroms* durch das Gestaltungsmodell unterstützt. Diese inhaltliche Anforderungen sehen die Expert:innen im Schnitt mit 1,33 als erfüllt an.
- (I-4): Die inhaltliche Anforderung der *Reduktion des Aufwands für die regelmäßige Datenakquise und -aktualisierung* wird durch die Expert:innen im Mittel mit 1,42 bewertet und somit als erfüllt betrachtet.
- (I-5): Die *Identifikation von Wechselwirkungen einzelner Prozessschritte* wird durch die Modellierung des Datenmodells unterstützt und im Mittel mit 1,17 bewertet. Daher wird die Anforderung als erfüllt betrachtet.
- (I-6): Das *Erkennen von Veränderungen und Trends* in der Leistung des Wertstroms wird durch die Auswahl der geeigneten Visualisierungstools unterstützt und im Mittel mit 1,42 bewertet. Somit gilt die Anforderung als erfüllt.

Im Folgenden wird die Erfüllung der inhaltlichen Anforderungen auf Basis des Konzepts des Digitalen Zwillings (I-7 – I-13) bewertet. Da diese bereits in der Konzeption des Gestaltungsmodells berücksichtigt wurden (vgl. Abschnitt 5.2), erfolgt eine analytische Argumentation bezüglich der Anforderungserfüllung.

- (I-7): Die *Integration der drei Ebenen – physisch, virtuell und Verbindungsebene* – ist im Rahmen der Konzeption des Gestaltungsmodells explizit berücksichtigt worden (vgl. Abschnitt 5.2). Das Gestaltungsmodell besteht aus den drei Ebenen, denen jeweils individuelle Gestaltungselemente zugeordnet sind. Demnach wird die Anforderung als erfüllt betrachtet.
- (I-8): Die *Ermöglichung der Datenakquise in der Produktion* ist in der Konzeption des Gestaltungsmodells durch das Gestaltungselement 1.3 Datenaufnahme berücksichtigt und wird durch zwei Gestaltungsprinzipien unterstützt. Die Anforderung wird daher als erfüllt betrachtet.
- (I-9): Die *Betrachtung eines Wertstroms von Rampe zu Rampe* wird als erfüllt angesehen, da unmittelbar im ersten Gestaltungselement der Wertstrom einer spezifischen Produktfamilie definiert wird und dahingehend die Systemgrenzen festgelegt werden.
- (I-10): Die *kontinuierliche Datenerfassung und -übertragung in die virtuelle Ebene* wird sowohl durch das Gestaltungselement 1.3 Datenaufnahme als auch

das Gestaltungselement 3.1 Schnittstelle physisch/virtuell mit jeweils zwei Gestaltungsprinzipien adressiert. Die Anforderung wird somit als erfüllt angesehen.

- (I-11): Der *Informationsrückfluss aus der virtuellen in die physische Ebene* wird durch das Gestaltungselement 3.2 Schnittstelle virtuell/physisch und vier Gestaltungsprinzipien behandelt. Die Nutzung der Informationen im Rahmen des vierten Methodenbausteins Anwendung im Wertstrommanagement wird detailliert aufgegriffen, da dies der zentrale Aspekt für ein funktionierendes Wertstrommanagement darstellt. Die Anforderung wird daher als erfüllt betrachtet.
- (I-12): Eine *Datenspeicherung* wird durch das Gestaltungselement 2.1 Historische Datenspeicherung adressiert. Die Anforderung wird somit erfüllt.
- (I-13): Der Aspekt der *Datenmodellierung* wird durch das Gestaltungsmodell im Gestaltungselement 2.2 berücksichtigt. Das dreistufige Vorgehen – konzeptionelles, logisches und physisches Datenmodell – hilft bei der Entwicklung eines wertstromspezifischen Datenmodells. Die Anforderung wird somit erfüllt.

### **Bewertung der formalen Anforderungen an das Gestaltungsmodell**

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Bewertung bzgl. der Erfüllung der formalen Anforderungen an das Gestaltungsmodell dargelegt sowie eine analytische Einschätzung durch den Autor der vorliegenden Forschungsarbeit vorgenommen:

- (F-G-1): Die Expert:innen sehen es im Mittel mit 1,25 als bestätigt an, dass durch das Gestaltungsmodell nur *relevante Sachverhalte modelliert* werden, die den Modellierungszweck unterstützen. Die formale Anforderung gilt somit als erfüllt.
- (F-G-2): Die zweite formale Anforderung bewertet, ob das *Modell verständlich gestaltet* ist. Durch die klare Unterteilung des Gestaltungsmodells in die drei Ebenen des Digitalen Zwillinges sowie die Aufteilung in Gestaltungselemente wird dies unterstützt. Die Expert:innen bestätigen dies mit einer durchschnittlichen Bewertung von 1,08. Da aufgrund der Komplexität der Datenmodellierung in der virtuellen Ebene Fachpersonal für die Umsetzung benötigt wird, wird die Anforderung nur als bedingt erfüllt angesehen.
- (F-G-3): Das Gestaltungsmodell soll *alle für die Stakeholder relevanten Informationen abbilden*. Dies wird durch die initiale Definition des Anwendungsfalls im Wertstrommanagement (Gestaltungselement 1.2) adressiert. Die Expert:innen sehen daher die Anforderung mit 1,50 als am besten erfüllt an.
- (F-G-4): Die Anforderung, dass das Gestaltungsmodell *nachträglich anpassbar* ist, wird durch die Expert:innen mit 1,25 bewertet. Somit wird die Anforderung erfüllt.
- (F-G-5): Die Anforderung, dass das Gestaltungsmodell *technisch, zeitlich und kostenmäßig implementierbar* ist, wird durchschnittlich mit 1,08 bewertet. Der tatsächliche Aufwand kann je nach Digitalisierungsgrad des Unternehmens variieren, sodass die Anforderung nur als bedingt erfüllt angesehen wird.

### Bewertung der formalen Anforderungen an die Methode

Abschließend erfolgt die Darstellung der Bewertung zur Erfüllung der formalen Anforderungen an die Methode zur Einführung des Gestaltungsmodells:

- (F-M-1): Die *Objektivität* der Methode wird durch die Expert:innen durchschnittlich mit 0,92 am schlechtesten bewertet. Aufgrund der notwendigen Kenntnisse in den Bereich Produktion und Datenmodellierung, ist für die Anwendung der Methode und des Gestaltungsmodells ein hohes Erfahrungswissen notwendig. Daher kann die Objektivität im Rahmen der Umsetzung nicht gewährleistet werden. Somit wird die Objektivität der Methode als einzige Anforderung nicht erfüllt.
- (F-M-2): Die *Reliabilität* besagt, dass die Methode unter gleichen Bedingungen zum gleichen Ergebnis führt. Die Verwendung der Modellierungssprache BPMN sowie der Definition zentraler Gateways unterstützt diese Anforderung. Die Expert:innen bestätigen dies (Mittelwert: 1,25). Die Anforderung wird somit erfüllt.
- (F-M-3): Die *Anpassbarkeit* der Methode wird über die Erweiterbarkeit des Gestaltungsmodells sichergestellt. Die Expert:innen bestätigen dies mit einer durchschnittlichen Bewertung von 1,17, sodass die Anforderung als erfüllt betrachtet wird.
- (F-M-4): Die *Generalisierbarkeit* wird durch die Anwendung in verschiedenen Unternehmen und Branchen gezeigt und wird durch die Expert:innen im Mittel mit 1,33 bestätigt. Aufgrund zeitlicher Einschränkungen bei den Anwendungsunternehmen konnte die Methode nur in einer standardisierten Laborumgebung vollumfänglich getestet werden. Aus diesem Grund wird die Anforderung zum aktuellen Zeitpunkt nur als bedingt erfüllt angesehen.
- (F-M-5): Die *Simplizität* der Methode zielt darauf ab, dass unerfahrene Anwender:innen durch einen klaren Lösungsweg zum Ziel geleitet werden. Die Unterteilung in Methodenbausteine sowie die Nutzung der Gateways unterstützen die Anwender:innen bei der Durchführung. Die Expert:innen bestätigen dies mit einem Mittelwert von 1,25. Aufgrund des erforderlichen Fachwissens wird die Erfüllung der Anforderung jedoch nur als bedingt erfüllt angesehen.

### 7.3 Fazit und kritische Diskussion

Das siebte Kapitel diente der Anwendung und Evaluation des entwickelten Gestaltungsmodells und der zugehörigen Methode, um den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn sowie die Anwendbarkeit in der industriellen Praxis sicherzustellen.

Die Anwendung des Gestaltungsmodells erfolgte zunächst in einem Unternehmen der Printmedienindustrie (Abschnitt 7.1.1). Dabei wurden die Implementierung Gestaltungsdimensionen 1-3 erläutert und zentrale Ergebnisse präsentiert. Weiterhin erfolgte die Anwendung der Methode in einem Unternehmen der Lebensmittelindustrie (Abschnitt 7.1.2). Es wurden die zentralen Ergebnisse präsentiert und jedes Gestaltungselement

sowie dessen Umsetzung erläutert. Besonderer Fokus lag auf der Anwendung des Entwickelten, um die Anwendbarkeit des Digitalen Wertstromzwillings in der industriellen Praxis zu verdeutlichen. Die Umsetzung zeigte, dass durch die Aktualität der Daten ein regelmäßiges Monitoring der Wertstromleistung realisierbar ist. Dieses war im Anwendungsfall notwendig, da es täglich zu Abweichungen vom Soll-Zustand an verschiedenen Prozessschritten kommt und somit die reaktive Problemlösung im operativen Tagesgeschäft unterstützt wurde. Weiterhin wurde durch die Genauigkeit der Daten sichergestellt, dass proaktive Verbesserungsmaßnahmen zielgerichtet angestoßen werden konnten und nicht aufgrund einer einmaligen Datenaufnahme falsche Rückschlüsse gezogen wurden. Die letzte Anwendung erfolgte in einer standardisierten Laborumgebung (Abschnitt 7.1.3), in der die Methode und das Gestaltungsmodell durchgängig angewendet wurden. Hierzu wurde im Rahmen einer ersten Testwoche der Digitale Wertstromzwilling implementiert und im Anschluss datenbasierte Verbesserungsmaßnahmen definiert und umgesetzt. In einer zweiten Testwoche wurde die Wirksamkeit der Maßnahmen überprüft und bestätigt. Die Umsetzung hebt die Wirksamkeit eines datenbasierten Wertstrommanagements hervor und verdeutlicht, dass ein Monitoring der Anpassungen ohne eine erneute Datenaufnahme am Ort der Wertschöpfung realisierbar ist und somit der Aufwand zur Datenaktualisierung minimiert wird.

Abschließend erfolgte die Evaluation des entwickelten Gestaltungsmodells und der Methode in der industriellen Praxis mithilfe eines strukturierten Fragebogens. Hierzu wurden die Projektbeteiligten sowie Expert:innen aus den Bereichen Wertstrommanagement und Digitalisierung befragt. Die Ergebnisse (Abschnitt 7.2) zeigen eine im Durchschnitt positive Bewertung der inhaltlichen und formalen Anforderungen. Somit wird das **Forschungsziel**, die Weiterentwicklung der Wertstrommethode mithilfe des Konzepts des Digitalen Zwillings zu einem datenbasierten Management-Ansatz, als erreicht angesehen. Die Anwendungen zeigen jedoch auch, dass für eine erfolgreiche Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings und die anschließende Anwendung im Wertstrommanagement ein hohes Maß an Fachwissen notwendig ist. Zusätzlich ist die Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Expert:innen, z. B. Wertstrommanager:innen und IT-Spezialist:innen, erforderlich, um die Verbindung zwischen physischer und virtueller Ebene zu ermöglichen. Die Entscheidung zur Implementierung eines Digitalen Wertstromzwillings sollte demnach gut überlegt sein und die Ziele im Vorfeld klar definiert werden, um eine fokussierte Entwicklung auf Basis des Anwendungsfalls zu gewährleisten (vgl. Abschnitt 4.2).

Daraus folgt, dass eine zielgerichtete Implementierung des Digitalen Wertstromzwillings ohne die Einführung eines schlanken Produktionssystems nicht als zielführend angesehen werden kann. Der Versuch, bestehende Verschwendungen ausschließlich durch digitale Technologien zu eliminieren, ohne die Produktionsprozesse zunächst zu verschlanken, führt in der Regel zu einer erhöhten Komplexität des Gesamtsystems. Daher sollte in der Praxis die Einführung und Etablierung eines schlanken Produktionssystems dem Prozess der vollständigen Digitalisierung der Wertströme vorangehen.



---

## 8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

---

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der vorliegenden Forschungsarbeiten zusammengefasst (Abschnitt 8.1) und ein Ausblick auf anknüpfende Forschungspotenziale gegeben (Abschnitt 8.2).

### 8.1 Zusammenfassung

In der gegenwärtigen Wettbewerbslandschaft müssen produzierende Unternehmen zunehmend auf sich wandelnde Marktbedürfnisse (*Market Pull*) und technologische Entwicklungen (*Technology Push*) reagieren. Marktbedingte Herausforderungen resultieren in steigenden Anforderungen an Zeit, Kosten, Qualität und Produktvarianz, die die Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen. Die in produzierenden Unternehmen etablierten Methoden der schlanken Produktion, insbesondere die Wertstrommethode, bieten die Möglichkeit, diese Anforderungen zu adressieren. Als Werkzeug zur Visualisierung der Material- und Informationsflüsse innerhalb eines Unternehmens, ist die Wertstrommethode dazu geeignet, die Produktion zielgerichtet an den Bedürfnissen der Kunden auszurichten. Gleichzeitig bietet der technologische Fortschritt durch die Digitalisierung die Möglichkeit, etablierte Methoden der schlanken Produktion weiterzuentwickeln. Für die Wertstrommethode eignet sich das Konzept des Digitalen Zwillings, um Effizienz und Transparenz zu steigern und die Methode zu einem Management-Ansatz weiterzuentwickeln. Die vorliegende Forschungsarbeit untersucht daher, wie ein integrativer Ansatz realisiert werden kann, der die Wertstrommethode mit dem Konzept des Digitalen Zwillings vereint. Insbesondere wird untersucht, wie die Wertstrommethode zu einem datenbasierten Management-Ansatz weiterentwickelt werden kann (*Technology Push*), um den spezifischen Kundenanforderungen (*Market Pull*) gerecht zu werden (vgl. Kapitel 1).

Der Stand der Wissenschaft und Technik zu Entwicklungsansätzen im Bereich der Wertstrommethode zeigt, dass es konzeptionelle Überlegungen zur Realisierung eines kontinuierlichen Wertstrommanagements sowie zur Integration der Digitalisierung in das *Wertstrommanagement* gibt. Diese Ansätze bleiben jedoch auf einer theoretischen Ebene und berücksichtigen selten eine praxisorientierte Perspektive. Vor diesem Hintergrund wird die Eignung bestehender Entwicklungsansätze der Wertstrommethode aus Sicht der *Digitalisierung in der Produktion* untersucht. Dabei zeigt sich, dass das Konzept des Digitalen Zwillings als das vielversprechendste angesehen wird. In der Literatur findet sich jedoch keine einheitliche Definition des *Digitalen Zwillings*, was die Notwendigkeit einer spezifischen Begriffsbestimmung im Rahmen des Wertstrommanagements begründet. Darauf aufbauend zeigt eine Analyse der aktuellen Forschungslandschaft, dass bisher ein umfassender Ansatz fehlt, der sowohl eine methodische Anleitung zur Umsetzung als auch Unterstützung bei der technischen Implementierung bietet (vgl. Kapitel 2).

Das Ziel dieser Forschungsarbeit wird daher in drei spezifische Teilziele gegliedert, um eine ganzheitliche Perspektive zu gewährleisten und die Entwicklungsprozesse

systematisch zu strukturieren. Zunächst dient die Analyse der *Aufgaben im Wertstrommanagement* als Grundlage für die Ermittlung des digitalen Unterstützungsbedarfs. Anschließend wird ein *Gestaltungsmodell* mit seinen *-dimensionen* entwickelt, das unmittelbar auf den Erkenntnissen des ersten Teilziels aufbaut. Abschließend erfolgt die Konzeption einer *Methode zur Umsetzung* dieses Modells, um die praktische Anwendung in der Industrie zu ermöglichen. Der Forschungsprozess folgt dabei der *Strategie der angewandten Forschung*, um sicherzustellen, dass die identifizierten praktischen Problemstellungen zunächst theoretisch aufgearbeitet und anschließend durch praktische Erprobungen validiert werden (vgl. Kapitel 3).

Zur Ermittlung der praxisrelevanten Aufgaben im Rahmen des Wertstrommanagements wird ein leitfadengestütztes Expert:innen-Interview (n=5) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sechs Aufgaben identifiziert werden konnten, die nach den drei Planungshorizonten kurz-, mittel- und langfristige klassifiziert werden. Zu den kurzfristigen Aufgaben zählen das *Monitoring des Wertstroms* und die *Produktionssteuerung*. Die mittelfristigen Aufgaben umfassen die *Dimensionierung des Wertstroms* und die *Initiierung von Verbesserungsprojekten*, während die langfristigen Aufgaben sich auf die *Neugestaltung und Umgestaltung des Wertstroms* konzentrieren. Um die Aufgaben zu unterstützen, werden zum einen spezifische Datenbedarfe je Anwendungsfall definiert und zum anderen Herausforderungen in der industriellen Praxis identifiziert, welche die Einführung eines Wertstrommanagements erschweren. Diese Herausforderungen werden in inhaltliche Anforderungen an das Gestaltungsmodell überführt, um die zielgerichtete Lösungsentwicklung zu unterstützen (vgl. Kapitel 4).

Im Kontext der praxisorientierten Entwicklung des Gestaltungsmodells erfolgt zunächst eine systematische Literaturanalyse zur Identifikation der technischen Gestaltungselemente eines Digitalen Zwillings im Produktionsumfeld. Die praktische Relevanz der identifizierten Elemente wird mittels einer strukturierten Expert:innen-Befragung (n=41) evaluiert. Basierend auf den Ergebnissen aus der industriellen Praxis und den inhaltlichen Anforderungen an einen Digitalen Zwilling werden die Gestaltungselemente in die drei Ebenen eines Digitalen Zwillings eingeordnet. Anschließend werden die Gestaltungselemente mithilfe von 27 Gestaltungsprinzipien, die auf bestehender Literatur sowie den praktischen Erfahrungen des Autors basieren, detailliert (vgl. Kapitel 5).

Um die praktische Anwendbarkeit in der Industrie zu gewährleisten, erfolgt die Transformation des Gestaltungsmodells in eine *Implementierungsmethode*, die mittels der Modellierungssprache BPMN dargestellt wird. Diese Methode ordnet die identifizierten Gestaltungselemente und zugehörigen Gestaltungsprinzipien in eine logische Abfolge für die operative Umsetzung. Dieser strukturierte Ansatz erleichtert nicht nur die Einführung neuer digitaler Werkzeuge im Wertstrommanagement, sondern unterstützt auch die kontinuierliche Verbesserung und Anpassung der Prozesse an zukünftige Anforderungen. Die Methode erleichtert die Identifikation und Operationalisierung von Verbesserungsmaßnahmen durch eine strukturierte Erfassung und Analyse der Wertstromdaten. Diese

Herangehensweise fördert die Transparenz in den Produktionsprozessen und unterstützt Entscheidungsträger:innen im Rahmen des Wertstrommanagements (vgl. Kapitel 6).

Die Anwendung und Evaluation des Gestaltungsmodells und der Implementierungsmethode findet im Rahmen von drei Anwendungsfällen statt. Zuerst wird das entwickelte Gestaltungsmodell in zwei produzierenden Unternehmen – in der Printmedien- und der Lebensmittelindustrie – angewendet. Anschließend erfolgt die Anwendung der Methode inklusive des Gestaltungsmodells an einem Wertstrom in den realitätsnahen Lernfabriken der TU Darmstadt. Im Rahmen der Anwendung wird die Erfüllung der gestellten inhaltlichen und formalen Anforderungen überprüft. Hierbei wird eine strukturierte Befragung von geschulten Personen aus der Industrie (n=12) durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die Expert:innen die gestellten Anforderungen im Mittel als erfüllt ansehen. Lediglich die Unabhängigkeit von subjektiven Einflüssen konnte aufgrund der Komplexität des Vorgehens nicht erfüllt werden (vgl. Kapitel 7).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Forschungsziel zur Weiterentwicklung der Wertstrommethode zu einem datenbasierten Management-Ansatz unter Zuhilfenahme des Konzepts des Digitalen Zwillings erreicht wurde. Die Integration des Digitalen Zwillings trägt somit zum einen zur Entwicklung von Unternehmen in Richtung eines vorgegebenen Nordsterns bei und liefert einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der Wertstrommethode. Zum anderen wird unmittelbar ein Beitrag zur Erreichung der Ziele der Industrie 4.0 geleistet. Neben der Unterstützung der horizontalen und vertikalen Integration trägt die Nutzung des Digitalen Wertstromzwillings dazu bei, den Mensch als Dirigent der Wertschöpfung zu bestätigen.

## 8.2 Ausblick

Aus den gewonnenen Erkenntnissen der vorliegenden Forschungsarbeit leiten sich die nachfolgenden Forschungspotenziale für zukünftige Arbeiten ab:

1. **Entwicklung einer Softwareapplikation:** Ausgehend von der Übersicht über bestehende Softwarelösungen (Anhang A.8) wird deutlich, dass derzeit keine Softwarelösung auf dem Markt verfügbar ist, die eine vollständige digitale Darstellung eines Wertstroms ermöglicht und gleichzeitig eine automatisierte Kalkulation der wertstromspezifischen Kennzahlen bietet. Um dies zu ermöglichen, ist in Zukunft die enge Zusammenarbeit zwischen Wertstromexpert:innen und IT-Spezialist:innen notwendig. Gemeinsam muss an einer anwendungsspezifischen Softwareapplikation gearbeitet werden, sodass der Digitale Wertstromzwilling in das Wertstrommanagement integriert werden kann.
2. **Erweiterung des Gestaltungsmodells um Data Analytics-Funktionen:** Das Gestaltungsmodell unterstützt die Anwender:innen bei der Implementierung eines Digitalen Wertstromzwillings. Dabei wird vor allem der Aufbau einer anwendungsfallspezifischen virtuellen Ebene fokussiert. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten die Gestaltungsprinzipien um die Integration geeigneter Data Analytics-

Funktionen erweitern. Als Ausgangspunkt für diese Weiterentwicklung kann die Arbeit von URNAUER dienen. In seiner Dissertation entwickelte er einen statischen Ansatz zur Integration ausgewählter Data Analytics-Funktionen in die Phasen der Wertstrommethode [URNA23b]. Die Zusammenführung beider Ansätze besitzt das Potenzial, automatisiert Verbesserungspotenziale zu identifizieren und die Wertstrommanager:innen bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen.

3. **Erweiterung um die Zieldimension Ressourceneffizienz:** Traditionell konzentriert sich das Wertstrommanagement auf die vier Zielgrößen der Produktion Zeit, Kosten, Qualität und Flexibilität [ERLA20]. Angesichts steigender Ressourcenkosten und externem Druck durch politische sowie kundenseitige Anforderungen stehen Unternehmen zunehmend vor der Herausforderung, ihren Ressourceneinsatz kritisch zu überprüfen. Die Notwendigkeit, ökologische Faktoren in die Verbesserung der Wertströme einzubeziehen, wird somit immer dringlicher. [STAU22] Durch die Implementierung von Kennzahlen zur Ressourceneffizienz im Rahmen des Wertstrommanagements können ressourcenintensive Prozessschritte identifiziert und gezielte Verbesserungsmaßnahmen eingeleitet werden. Erste Ansätze hierzu finden sich in der Arbeit von [BAUS23].
4. **Integration mathematischer Optimierungsmodelle:** Das primäre Ziel des Wertstrommanagements besteht darin, kontinuierlich Verbesserungspotenziale zu identifizieren, um den Wertstrom zielgerichtet in Richtung des definierten Soll-Zustandes weiterzuentwickeln. Häufig basieren die Verbesserungspotenziale auf Problematiken, deren Ursachen mithilfe mathematischer Optimierungsmodelle darstellbar sind. Bei der Gestaltung des Soll-Zustandes eines Wertstroms werden sowohl in der *DIN-Norm 22468* zum Wertstrommanagement [DIN20] als auch im *Grundlagenwerk von ERLACH* [ERLA20] Berechnungen zur Auslegung des Wertstroms vorgenommen. Da diese Berechnungen derzeit auf einer subjektiven und ungenauen Datenbasis aus einer Momentaufnahme auf dem Shopfloor beruhen, sind die Ergebnisse mit Unsicherheit behaftet. In diesem Kontext bietet die Datenbasis des Digitalen Wertstromzwillings die Möglichkeit, mathematische Optimierungsmodelle zu implementieren und auf Basis unterschiedlicher Zielgrößen bessere Entscheidungen zu treffen. Erste Erprobungen im Rahmen der Erstellung der vorliegenden Forschungsarbeit zeigen vielversprechende Ergebnisse.

Der kontinuierliche Trend zur umfangreichen Datenerfassung in Produktionsprozessen sowie die zunehmende Komplexität der Herstellungsverfahren unterstreicht die anhaltende Relevanz von Methoden der schlanken Produktion, insbesondere der Wertstrommethode, für den Unternehmenserfolg. Die spezifische Anpassung und Weiterentwicklung dieser Methoden unter Einsatz digitaler Technologien ist dabei weiterhin von entscheidender Bedeutung. Die vorliegende Forschungsarbeit leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung einer effizienten und zielgerichteten Datenerfassung entlang des Wertstroms, die eine Effizienzsteigerung und Verbesserung von Produktionsprozessen ermöglicht.

---

**9 LITERATURVERZEICHNIS**

---

- [ABEL11] Abele, E.; Reinhart, G. (2011): *Zukunft der Produktion – Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*, München: Hanser.
- [ABEL15] Abele, E.; Anderl, R.; Metternich, J.; Wank, A.; Anokhin, O.; Arndt, A.; Meudt, T.; Sauer, M. (2015): *Effiziente Fabrik 4.0*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 130 (3), S. 150–153.
- [ABEL24] Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M.; Kreß, A. (2024): *Learning Factories*, Cham: Springer International Publishing.
- [AGOS21] Agostinho, V.; Baldo, C. R. (2021): *Assessment of the impact of Industry 4.0 on the skills of Lean professionals*. In: *Procedia CIRP* 96, S. 225–229.
- [AHMA18] Ahmad, R.; Masse, C.; Jituri, S.; Doucette, J.; Mertiny, P. (2018): *Alberta Learning Factory for training reconfigurable assembly process value stream mapping*. In: *Procedia Manufacturing* 23, S. 237–242.
- [AL-M20] Al-Masri, E.; Kalyanam, K. R.; Batts, J.; Kim, J.; Singh, S.; Vo, T.; Yan, C. (2020): *Investigating Messaging Protocols for the Internet of Things (IoT)*. In: *IEEE Access* 8, S. 94880–94911.
- [ANGR17] Angrish, A.; Starly, B.; Lee, Y.-S.; Cohen, P. H. (2017): *A flexible data schema and system architecture for the virtualization of manufacturing machines (VMM)*. In: *Journal of Manufacturing Systems* 45, S. 236–247.
- [ASSA19] Assawaarakul, C.; Srisawat, W.; Ayuthaya, S. D. N.; Wattanasirichai-goon, S. (2019 - 2019): *Integrate Digital Twin to Exist Production System for Industry 4.0: 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON)*: IEEE.
- [BABE21] Babel, W. (2021): *Industrie 4.0, China 2025, IoT*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [BABE23] Babel, W. (2023): *Internet of Things und Industrie 4.0*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg.
- [BALA20] Balaji, V.; Venkumar, P.; Sabitha, M. S.; Amuthaguka, D. (2020): *DVSMS: dynamic value stream mapping solution by applying IIoT*. In: *Sādhanā* 45 (38).
- [BAND10] Bandow, G.; Holzmüller, H. H. (2010): *"Das ist gar kein Modell!" – Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*, Wiesbaden: Gabler Research.

- [BANK21] Bank, L.; Luber, M.; Theumer, P.; Zipfel, A.; Kämpfer, T.; Hiller, T.; Heuer, T.; Demke, T.; Mundt, C.; Köster, N.; Janke, T.; Maibaum, J.; Schmidhuber, M. (2021): PPS-Report 2021 - Studienergebnisse, Augsburg.
- [BATI09] Batini, C.; Cappiello, C.; Francalanci, C.; Maurino, A. (2009): Methodologies for Data Quality Assessment and Improvement. In: ACM Computing Surveys 41 (3).
- [BAUE16] Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G. (2016): WGP-Standpunkt Industrie 4.0.
- [BAUS23] Bausch, P.; Weyand, A.; Weigold, M.; Metternich, J. (2023): Design Model For Traceability-Supported Assessment Of Product Carbon Footprint. In: Herberger, D.; Hübner, M.; Stich, V. (Hrsg.): Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2023-1. Hannover: publish-Ing., S. 107–117.
- [BAYI22] Bayılmış, C.; Ebleme, M. A.; Çavuşoğlu, Ü.; Küçük, K.; Sevin, A. (2022): A survey on communication protocols and performance evaluations for Internet of Things. In: Digital Communications and Networks 8, S. 1094–1104.
- [BEAU11] Beaujean, P. (2011): Modular gestaltetes reaktives Qualitätsmanagement. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen.
- [BECK12] Becker, J.; Probandt, W.; Vering, O. (2012): Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung – Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [BENN14] Bennett, D. (2014): Future challenges for manufacturing. In: Journal of Manufacturing Technology Management 25 (1), S. 2–6.
- [BOOC04] Booch, G.; Rumbaugh, J.; Jacobson, I. (2004): The unified modeling language user guide, Boston: Addison-Wesley.
- [BORD20] Bordeleau, F.; Combemale, B.; Eramo, R.; van den Brand, M.; Wimmer, M. (2020): Towards Model-Driven Digital Twin Engineering: Current Opportunities and Future Challenges. In: Babur, Ö.; Denil, J.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Systems Modelling and Management. Cham: Springer International Publishing, S. 43–54.
- [BOSC18] Boschert, S.; Heinrich, C.; Rosen, R. (2018): Next generation digital twin. In: Horváth, I.; Suárez Rivero, J. P.; Hernández Castellano, P. M. (Hrsg.): Proceedings of TMCE 2018. Las Palmas de Gran Canaria, S. 209–218.

- [BRAG09] Braglia, M.; Frosolini, M.; Zammori, F. (2009): Uncertainty in value stream mapping analysis. In: *International Journal of Logistics: Research and Applications* 12 (6), S. 435–453.
- [BUER18] Buer, S.-V.; Strandhagen, J. O.; Chan, F. T. S. (2018): The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. In: *International Journal of Production Research* 56 (8), S. 2924–2940.
- [BUND21] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021): *Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland – Technologie- und Trendradar 2021*, Berlin.
- [CHEN77] Chen, P. P.-S. (1977): *The Entity-Relationship Model - Toward a Unified View of Data*, Cambridge, Massachusetts.
- [CHIC15] Chickerur, S.; Goudar, A.; Kinnerkar, A. (2015): Comparison of Relational Database with Document-Oriented Database (MongoDB) for Big Data Applications: 2015 8th International Conference on Advanced Software Engineering & Its Applications (ASEA): IEEE, S. 41–47.
- [CHMI94] Chmielewicz, K. (1994): *Forschungskonzeptionen der Wirtschaftswissenschaft*, Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- [CIAN21] Ciano, M. P.; Dallasega, P.; Orzes, G.; Rossi, T. (2021): One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study. In: *International Journal of Production Research* 59 (5), S. 1386–1410.
- [CIMI19] Cimino, C.; Negri, E.; Fumagalli, L. (2019): Review of digital twin applications in manufacturing. In: *Computers in Industry* 113 (103130).
- [CLEV20] Cleve, J.; Lämmel, U. (2020): *Data Mining*, Berlin, Boston: De Gruyter.
- [CORO18] Coronado, P. D. U.; Lynn, R.; Louhichi, W.; Parto, M.; Wescoat, E.; Kurfess, T. (2018): Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system. In: *Journal of Manufacturing Systems* 48, S. 25–33.
- [D’AM19] D’Amico, D.; Ekoyuncu, J.; Addepalli, S.; Smith, C.; Keedwell, E.; Sibson, J.; Penver, S. (2019): Conceptual framework of a digital twin to evaluate the degradation status of complex engineering systems. In: *Procedia CIRP* 86, S. 61–67.
- [DAVI20] Davis, N.; Companiwala, A.; Muschard, B.; Petrusch, N. (2020): 4th Industrial Revolution Design Through Lean Foundation. In: *Procedia CIRP* 91, S. 306–311.
- [DEMI18] Deming, W. E. (2018): *Out of the Crisis*: The MIT Press.

- [DEUT95] Deutsche Gesellschaft für Qualität (1995): SPC 2 - Qualitätsregelkartentechnik, Berlin, Wien, Zürich: Beuth.
- [DILL22a] Dillinger, F.; Bergermeier, J.; Reinhart, G. (2022): Implications of Lean 4.0 Methods on Relevant Target Dimensions: Time, Cost, Quality, Employee Involvement, and Flexibility. In: *Procedia CIRP* 107, S. 202–208.
- [DILL22b] Dillinger, F.; Tropschuh, B.; Dervis, M. Y.; Reinhart, G. (2022): A Systematic Approach to Identify the Interdependencies of Lean Production and Industry 4.0 Elements. In: *Procedia CIRP* 112, S. 85–90.
- [DIN20] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2020): Wertstrommethode (VSM) (ISO 22468:2020). DIN ISO (22468): Beuth-Verlag, Berlin.
- [DOMB15] Dombrowski, U.; Mielke, T. (2015): *Ganzheitliche Produktionssysteme – Einleitung und historische Entwicklung. Aktueller Stand und zukünftige*, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [DÖRI16] Döring, N.; Bortz, J. (2016): *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [DUDE23] Duden (2023): Methode. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Methode> (Zugriff am 11.04.2024).
- [DURÃ18] Durão, L. F. C. S.; Haag, S.; Anderl, R.; Schützer, K.; Zancul, E. (2018): Digital Twin Requirements in the Context of Industry 4.0. In: Chiabert, P.; Bouras, A.; Noël, F.; Ríos, J. (Hrsg.): *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*. Cham: Springer International Publishing, S. 204–214.
- [EBER14] Ebert, C. (2014): *Systematisches Requirements Engineering – Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verwalten*, Heidelberg: dpunkt-Verlag.
- [ELLG18] Ellgass, W.; Holt, N.; Saldana-Lemus, H.; Richmond, J.; Barenji, A. V.; Gonzalez-Badillo, G. (2018): A Digital Twin Concept for Manufacturing Systems: Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Pittsburgh, USA, S. 1–9.
- [ELMA02] Elmasri, R.; Navathe, S. (2002): *Grundlagen von Datenbanksystemen*, München: Pearson Studium.
- [ERLA20] Erlach, K. (2020): *Wertstromdesign – Der Weg zur schlanken Fabrik*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [ERLA21] Erlach, K.; Böhm, M.; Gessert, S.; Hartleif, S.; Teriete, T.; Ungern-Sternberg, R. (2021): Die zwei Wege der Wertstrommethode zur Digitalisierung – Datenwertstrom und WertstromDigital als Stoßrichtungen der



- Forschung für die digitalisierte Produktion. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116 (12), S. 940–944.
- [ERLA23] Erlach, K.; Böhm, M.; Böttcher, L.; Gessert, S.; Kegler, S.; Teriete, T.; Ungern-Sternberg, R. (2023): Rahmenwerk für die vier Phasen der digitalisierten Wertstrommethode. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 118 (10), S. 658–664.
- [EURO23] Eurostat (2023): Kleine und mittlere Unternehmen (KMU). [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Enterprise\\_size/de](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Enterprise_size/de) (Zugriff am 11.04.2024).
- [FAHR16] Fahrmeir, L.; Heumann, C.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G. (2016): Statistik – Der Weg zur Datenanalyse, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- [FELD19] Felderer, M.; Russo, B.; Auer, F. (2019): On Testing Data-Intensive Software Systems. In: Biffel, S.; Eckhart, M.; Lüder, A.; Weippl, E. (Hrsg.): Security and Quality in Cyber-Physical Systems Engineering. Cham: Springer International Publishing, S. 129–148.
- [FERN18] Fernandes, D.; Bernardino, J. (2018): Graph Databases Comparison: AllegroGraph, ArangoDB, InfiniteGraph, Neo4J, and OrientDB. In: Bernardino, J.; Quix, C. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Data Science, Technology and Applications: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, S. 373–380.
- [FLEI18] Fleischer, J.; Klee, B.; Spohrer, A.; Merz, S. (2018): Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0 – Wege zum kostengünstigen Sensorsystem, Frankfurt am Main.
- [FLOR12] Floratou, A.; Teletia, N.; Dewitt, D. J.; Patel, J. M.; Zhang, D. (2012): Can the Elephants Handle the NoSQL Onslaught? In: Proceedings of the VLDB Endowment (PVLDB) 5 (12), S. 1712–1723.
- [FLOR22] Florescu, A.; Barabas, S. (2022): Development Trends of Production Systems through the Integration of Lean Management and Industry 4.0. In: Applied Sciences 12 (10), S. 4885.
- [FORN14] Forno, A. J. D.; Pereira, F. A.; Forcellini, F. A.; Kipper, L. M. (2014): Value Stream Mapping: a study about the problems and challenges found in the literature from the past 15 years about application of Lean tools. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 72 (5-8), S. 779–790.
- [FREI21] Freitag, N. (2021): Implementierung eines digitalen Wertstromabbildes für die Prozessindustrie am Beispiel der Ferrero OHG GmbH. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

- [FRIC20] Frick, N.; Urnauer, C.; Metternich, J. (2020): Echtzeitdaten für das Wertstrommanagement. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (4), S. 220–224.
- [FRIC21a] Frick, N.; Freitag, N. (2021): Anwendungsfall Lebensmittelindustrie - Gewichtung der Softwareanforderungen. <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4251.2> (Zugriff am 04.06.2024).
- [FRIC21b] Frick, N.; Reintke, M. (2021): Expert:innen-Interviews Aufgaben im Wertstrommanagement. <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4247> (Zugriff am 04.06.2024).
- [FRIC22a] Frick, N.; Metternich, J. (2022): The Digital Value Stream Twin. In: Systems 10 (4), S. 1–11.
- [FRIC22b] Frick, N.; Terwolbeck, J. (2022): Ermittlung der Gestaltungselemente eines Digitalen Wertstromzwillings. <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4249> (Zugriff am 04.06.2024).
- [FRIC23] Frick, N.; Reintke, M.; Metternich, J. (2023): Wertstrommanagement im Zeitalter dynamischer Produktionssysteme – Aufgaben und Herausforderungen - ein Blick aus der Praxis. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 118 (6), S. 400–405.
- [FRIC24a] Frick, N. (2024): Evaluation der Anforderungen an einen Digitalen Wertstromzwillings. <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4252> (Zugriff am 04.06.2024).
- [FRIC24b] Frick, N.; Bausch, P.; Sandner, S.; He, F.; Weyand, A.; Wendt, J. (2024): Anwendung standardisierte Laborumgebung - Rohdaten der Produktionswochen. <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4250> (Zugriff am 04.06.2024).
- [FRIC24c] Frick, N.; Bausch, P.; Sutter, R.; Dickert, M.; Doll, A.; Gradl, D. C.; Hartmann, L. (2024): Dashboard zur bauteilindividuellen CO2-Bilanzierung auf Basis von Wertstromdaten. <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4253> (Zugriff am 04.06.2024).
- [FRIC24d] Frick, N.; Metternich, J. (2024): Implementing a Digital Twin of a Value Stream. In: Procedia CIRP (in press).
- [FRIC24e] Frick, N.; Neumann, F. (2024): Gewichtung Softwareanforderungen Anwendung standardisierte Laborumgebung. <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4248.2> (Zugriff am 04.06.2024).
- [FRIC24f] Frick, N.; Terwolbeck, J.; Seibel, B.; Metternich, J. (2024): Design Model for the Digital Shadow of a Value Stream. In: Systems 12 (1), S. 1–24.

- [FRIE90] Friedrichs, J. (1990): Methoden empirischer Sozialforschung, Opladen.
- [FULL20] Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; Barlow, C. (2020): Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. In: IEEE Access 8, S. 108952–108971.
- [GADA12] Gadatsch, A. (2012): Grundkurs Geschäftsprozess-Management, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- [GARE12] Garetti, M.; Rosa, P.; Terzi, S. (2012): Life Cycle Simulation for the design of Product-Service Systems. In: Computers in Industry 63 (4), S. 361–369.
- [GEIS11] Geisler, F. (2011): Datenbanken - Grundlagen und Design, Berlin: Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm.
- [GERO23] Gerodimos, A.; Maglaras, L.; Ferrag, M. A.; Ayres, N.; Kantzavelou, I. (2023): IoT: Communication protocols and security threats. In: Internet of Things and Cyber-Physical Systems 3, S. 1–13.
- [GLÄS09] Gläser, J.; Laudel, G. (2009): Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse – als Instrument rekonstruierender Untersuchungen, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- [GOTT19] Gottmann, J. (2019): Produktionscontrolling – Wertströme und Kosten optimieren, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [GRAF96] Graf, G. (1996): Das Phänomen Lean Management – Eine kritische Analyse, Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- [GREW08] Grewal, C. (2008): An initiative to implement lean manufacturing using value stream mapping in a small company. In: International Journal of Manufacturing Technology and Management 15 (3/4), S. 404–417.
- [GRIE14] Grieves, M. (2014): Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. Digital Twin White Paper.
- [GRÖM23] Grömling, M. (2023): Hartnäckige Produktionslücken der deutschen Industrie, Köln.
- [GÜNT19] Günther, L. C.; Colangelo, E.; Wiendahl, H.-H.; Bauer, C. (2019): Data quality assessment for improved decision-making: a methodology for small and medium-sized enterprises. In: Procedia Manufacturing 29, S. 583–591.
- [GUO21] Guo, H.; Chen, M.; Mohamed, K.; Qu, T.; Wang, S.; Li, J. (2021): A digital twin-based flexible cellular manufacturing for optimization of air conditioner line. In: Journal of Manufacturing Systems 58, S. 65–78.
- [HÄDE19] Häder, M. (2019): Empirische Sozialforschung – Eine Einführung, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

- [HÄMM10] Hämmerle, M. (2010): 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 Verlag.
- [HART21] Hartmann, L. (2021): Wertstromdesign 4.0 – Methode zur integrierten Gestaltung von Material- und Informationsflüssen für schlanke Wertströme. Dissertation, Darmstadt: Shaker Verlag.
- [HE18] He, Y.; Guo, J.; Zheng, X. (2018): From Surveillance to Digital Twin – Challenges and recent advances of signal processing for the industrial Internet of Things. In: IEEE Signal Processing Magazine, S. 120–129.
- [HERS20] Herstätter, P.; Wildbolz, T.; Hulla, M.; Ramsauer, C. (2020): Data acquisition to enable Research, Education and Training in Learning Factories and Makerspaces. In: Procedia Manufacturing 45, S. 289–294.
- [HEUE02] Heuer, A.; Saake, G.; Sattler, K.-U. (2002): Datenbanken kompakt – Entwurf von Datenbanken; Einführung in SQL; Anwendungsentwicklung und Internet-Anbindung; Online-Shop als durchgängige, praxisnahe Beispielanwendung, Bonn: mitp-Verlag.
- [HINE98] Hines, P.; Rich, N.; Richeno, J.; Brunt, D.; Taylor, D.; Butterworth, C.; Sullivan, J. (1998): Value Stream Management. In: The International Journal of Logistics Management 9 (1), 25-42.
- [HORS22] Horsthofer-Rauch, J.; Schumann, M.; Milde, M.; Vernim, S.; Reinhart, G. (2022): Digitalized value stream mapping: review and outlook. In: Procedia CIRP 112, S. 244–249.
- [HUAN19] Huang, Z.; Kim, J.; Sadri, A.; Dowey, S.; Dargusch, M. S. (2019): Industry 4.0: Development of a multi-agent system for dynamic value stream mapping in SMEs. In: Journal of Manufacturing Systems 52, S. 1–12.
- [HÜBN18] Hübner, C.; Suchold, N.; Alex, J.; Thron, M.; Zipper, H.; Rieger, L. (2018): Offene Plattform für die Prozessoptimierung – Digitaler Zwilling im Wassermanagement 4.0 – Effiziente Lösungen durch Modellierung und Simulation. In: Verband deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Berichte Nr. 2330: VDI Verlag, S. 493–502.
- [ISO18] International Organization for Standardization (2018): Systems and software engineering - Life cycle processes - Requirements engineering. ISO/IEC/IEEE (29148), Geneva.
- [ISO21] International Organization for Standardization (2021): Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. ISO (23247-1:2021), Geneva.

- [ISO22] International Organization for Standardization (2022): ISO 8000-2 Data quality - Part 2: Vocabulary. ISO (8000-2), Geneva.
- [IYER23] Iyer, S. V.; Sangwan, K. S.; Dhiraj (2023): Digitalization: a tool for the successful long-term adoption of lean manufacturing. In: *Procedia CIRP* 116, S. 245–250.
- [JARO16] Jarosch, H. (2016): *Grundkurs Datenbankentwurf*, Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [JEON20] Jeon, S. M.; Schuesslbauer, S. (2020): Digital Twin Application for Production Optimization. In: Ganley, D.; Doyle, L.; Jennings, B. (Hrsg.): *2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*: IEEE, S. 542–545.
- [JONE20] Jones, D.; Snider, C.; Nassehi, A.; Yon, J.; Hicks, B. (2020): Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 29, S. 36–52.
- [KAGE13] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (2013): *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*, Frankfurt am Main.
- [KAIS19] Kaiser, J.; Urnauer, C.; Metternich, J. (2019): A framework for planning logistical alternatives in value stream design. In: *Procedia CIRP* 81, S. 180–185.
- [KASP15] Kaspar, S.; Schneider, M. (2015): Lean und Industrie 4.0 in der Intralogistik – Effizienzsteigerung durch Kombination der beiden Ansätze. In: *productivity* 20 (5), S. 17–20.
- [KAUF17] Kaufmann, T.; Forstner, L. (2017): Horizontale Integration der Wertschöpfungskette in der Halbleiterindustrie. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1. Produktion*: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 95–103.
- [KAUF23] Kaufmann, M.; Meier, A. (2023): *SQL- & NoSQL-Datenbanken*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [KELL22a] Kellner, F.; Lienland, B.; Lukesch, M. (2022): *Produktionswirtschaft*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [KELL22b] Kellner, F.; Lienland, B.; Lukesch, M. (2022): *Produktionswirtschaft – Planung, Steuerung und Industrie 4.0*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [KERS14] Kersting, M.; Werbeck, N.; Ebben, T. (2014): *Angewandte Nutzwertanalyse in der Planung und Verwaltung*, Essen.

- [KETT17] Ketteler, D.; König, C. (2017): Lean 4.0 - Schlank durch Digitalisierung, Frankfurt am Main.
- [KINK20] Kinkel, S.; Beiner, S.; Schäfer, A.; Heimberger, H.; Jäger, A. (2020): Wertschöpfungspotenziale 4.0 – Bewertung der ungenutzten Wertschöpfungspotenziale der baden-württembergischen und deutschen Industrie in Zeiten der Digitalisierung der Wertschöpfung, Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung.
- [KLET22] Kletti, J.; Rieger, J. (2022): Die perfekte Produktion, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [KLEV07] Klevers, T. (2007): Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design – Verschwendung erkennen - Wertschöpfung steigern, Landsberg am Lech, Heidelberg: mi-Fachverlag.
- [KLEV13] Klevers, T. (2013): Wertstrom-Management – Mehr Leistung und Flexibilität für Unternehmen, Frankfurt am Main, New York, NY: Campus-Verlag.
- [KLIP23] Klipfel, S. (2023): Entwicklung einer Methodik zur Erstellung eines wertstrom-spezifischen Datenmodells zur Realisierung eines digitalen Prozesszwilling. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- [KNOL19] Knoll, D.; Reinhart, G.; Prüglmeier, M. (2019): Enabling value stream mapping for internal logistics using multidimensional process mining. In: Expert Systems with Applications 124, S. 130–142.
- [KÖNI17] König, A.; Graf-Vlachy, L. (2017): Industrie 4.0: Strategische Innovation durch Strategische Sensitivität. In: Obermaier, R. (Hrsg.): Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 53-68.
- [KRAF88] Krafcik, J. F. (1988): Triumph of the Lean Production System. In: Sloan Management Review 30 (1), S. 41–52.
- [KRIT18] Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W. (2018): Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: IFAC-PapersOnLine 51 (11), S. 1016–1022.
- [KRUG21] Kruger, K.; Redelinghuys, A. J. H.; Basson, A. H.; Cardin, O. (2021): Past and Future Perspectives on Digital Twin Research at SOHOMA. In: Borangiu, T.; Trentesaux, D.; Leitão, P.; Cardin, O.; Lamouri, S. (Hrsg.): Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. Cham: Springer International Publishing, S. 81–98.

- [KUNA18] Kunath, M.; Winkler, H. (2018): Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process. In: *Procedia CIRP* 72, S. 225–231.
- [LADE22] Ladegourdie, M.; Kua, J. (2022): Performance Analysis of OPC UA for Industrial Interoperability towards Industry 4.0. In: *IoT* 3 (4), S. 507–525.
- [LAI19] Lai, N. Y. G.; Kang, H. S. (2019): Industry 4.0 Enhanced Lean Manufacturing. In: 2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management, S. 206–211.
- [LANG21a] Langmann, R. (2021): *Vernetzte Systeme für die Automatisierung 4.0 – Bussysteme - Industrial Ethernet - Mobile Kommunikation - Cyber-Physical Systems*, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- [LANG21b] Langlotz, P.; Aurich, J. C. (2021): Causal and temporal relationships within the combination of Lean Production Systems and Industry 4.0. In: *Procedia CIRP* 96, S. 236–241.
- [LEE14] Lee, J.; Kao, H.-A.; Yang, S. (2014): Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. In: *Procedia CIRP* 16, S. 3–8.
- [LICH15] Lichtblau, K.; Stich, V.; Bertenrath, R.; Blum, M.; Bleider, M.; Millack, A.; Schmitt, K.; Schmitz, E.; Schröter, M. (2015): *Industrie 4.0-Readiness*, Aachen, Köln.
- [LIKE06] Liker, J. K.; Meier, D. (2006): *Toyota Way Fieldbook – A Practical Guide for Implementing Toyota's 4Ps*: McGraw-Hill Professional.
- [LIKE13a] Liker, J. K.; Meier, D. (2013): *Toyota way fieldbook – A practical guide for implementing Toyota's 4Ps*, New York: McGraw-Hill Education.
- [LIKE13b] Liker, J. K. (2013): *Toyota Way – 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*, New York: McGraw-Hill Education.
- [LIND09] Lindemann, U. (2009): *Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [LIND19] Lindner, A.; Richter, I. (2019): *Wertstromdesign*, München: Carl Hanser Verlag München.
- [LITT70] Little, J. D. C. (1970): Models and Managers: The Concept of a Decision Calculus. In: *Management Science* 16 (8), S. 466–485.
- [LIU20] Liu, Q.; Yang, H. (2020): An Improved Value Stream Mapping to Prioritize Lean Optimization Scenarios Using Simulation and Multiple-Attribute Decision-Making Method. In: *IEEE Access* 8, S. 204914–204930.

- [LIU23] Liu, C.; Zhang, Y. (2023): Advances and hotspots analysis of value stream mapping using bibliometrics. In: *International Journal of Lean Six Sigma* 14 (1), S. 190–208.
- [LU21] Lu, Y.; Liu, Z.; Min, Q. (2021): A digital twin-enabled value stream mapping approach for production process reengineering in SMEs. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 34 (7-8), S. 764–782.
- [LUFT16] Luft, T.; Le Cardinal, J.; Wartzack, S. (2016): Methoden der Entscheidungsfindung. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Hanser, S. 759–803.
- [LUGE17a] Lugert, A.; Winkler, H. (2017): Von der Wertstromanalyse zum Wertstrommanagement – Wie die statische Lean-Methode mit Industrie-4.0-Lösungen zu einem dynamischen Managementansatz weiterentwickelt werden kann. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (4), S. 261–265.
- [LUGE17b] Lugert, A.; Winkler, H. (2017): Von der Wertstromanalyse zum Wertstrommanagement. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (4), S. 261–265.
- [LUGE18] Lugert, A.; Völker, K.; Winkler, H. (2018): Dynamization of Value Stream Management by technical and managerial approach. In: *Procedia CIRP* 72, S. 701–706.
- [LUGE19a] Lugert, A.; Winkler, H. (2019): Zukunftsfähigkeit der Wertstrommethode im Kontext von Industrie 4.0. In: *Logistics Journal*.
- [LUGE19b] Lugert, A. (2019): *Dynamisches Wertstrommanagement im Kontext von Industrie 4.0*, Berlin: Logos Berlin.
- [LUST10] Lustig, I.; Dietrich, B.; Johnson, C.; Dziekan, C. (2010): An IBM view of the structured data analysis landscape: descriptive, predictive and prescriptive analytics. In: *Business Analytics* (6).
- [MAGN21] Magnanini, M. C.; Melnychuk, O.; Yemane, A.; Strandberg, H.; Ricondo, I.; Borzi, G.; Colledani, M. (2021): A Digital Twin-based approach for multi-objective optimization of short-term production planning. In: *IFAC-PapersOnLine* 54 (1), S. 140–145.
- [MATH20] Mathupriya, S.; Saira Banu, S.; Sridhar, S.; Arthi, B. (2020): WITHDRAWN: Digital twin technology on IoT, industries & other smart environments: A survey. In: *Materials Today: Proceedings*.
- [MAUR17] Maurer, J. (2017): *Studie Industrie 4.0 2017*, München.



- [MAYR18] Mayr, A.; Weigelt, M.; Kühl, A.; Grimm, S.; Erll, A.; Potzel, M.; Franke, J. (2018): Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. In: *Procedia CIRP* 72, S. 622–628.
- [MELE20] Melesse, T. Y.; Di Pasquale, V.; Riemma, S. (2020): Digital Twin Models in Industrial Operations: A Systematic Literature Review. In: *Procedia Manufacturing* 42, S. 267–272.
- [MERT17] Mertens, P.; Barbian, D.; Baier, S. (2017): *Digitalisierung und Industrie 4.0 - eine Relativierung*, Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- [METT16] Metternich, J.; Wank, A.; Meudt, T.; Antos, V.; Geßner, F.; Habedank, C.; Halbig, F.; Volz, H. (2016): Methodik zur wertstromdurchgängigen Bauteilkennzeichnung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (03), S. 135–138.
- [METT17] Metternich, J.; Müller, M.; Meudt, T.; Schaede, C. (2017): Lean 4.0 – zwischen Widerspruch und Vision. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (5), S. 346–348.
- [METT18] Metternich, J.; Meudt, T.; Hartmann, L. (2018): Leitfaden Industrie 4.0 trifft Lean – Wertschöpfung ganzheitlich steigern.
- [METT22] Metternich, J.; Meudt, T.; Hartmann, L. (2022): *Wertstrom 4.0 – Wertstromanalyse und Wertstromdesign für eine schlanke, digitale Auftragsabwicklung*, München: Carl Hanser Verlag München.
- [METT24] Metternich, J.; Müller, M.; Hertle, C.; Longard, L.; Wang, Y. (2024): *Digitales Shopfloor Management – Einführung, Erfolgskonzepte, Werkzeuge*, München: Hanser.
- [MEUD20] Meudt, T. (2020): *Wertstromanalyse 4.0 – Eine Methode zur integrierten Erfassung und Analyse von Material- und Informationsflüssen im Wertstrom*, Düren: Shaker Verlag.
- [MICH22] Michael, J.; Pfeiffer, J.; Rumpe, B.; Wortmann, A. (2022): Integration Challenges for Digital Twin Systems-of-Systems. In: *2022 IEEE/ACM 10th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems and Software Ecosystems (SESoS)*, S. 9–12.
- [MOOD94] Moody, D. L.; Shanks, G. G. (1994): What makes a good data model? Evaluating the quality of entity relationship models. In: *Entity-Relationship Approach - ER '94 Business Modelling and Reengineering*, S. 94–111.
- [MUSA19] Musa, E.; Delac, G.; Silic, M.; Vladimir, K. (2019): Comparison of Relational and Time-Series Databases for Real-Time Massive Datasets. In: *Computer Science*, S. 1065–1070.

- [NACH97] Nachreiner, F. (1997): Grundlagen naturwissenschaftlicher Methodik in den Arbeitswissenschaften. In: Luczak, H.; Volpert, W. (Hrsg.): Handbuch Arbeitswissenschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 87–92.
- [NAYA13] Nayak, A.; Poriya, A.; Poojary, D. (2013): Type of NOSQL Databases and its Comparison with Relational Databases. In: International Journal of Applied Information Systems 5 (4), S. 16–19.
- [NEGR17] Negri, E.; Fumagalli, L.; Macchi, M. (2017): A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. In: Procedia Manufacturing 11, S. 939–948.
- [NETO20] Neto, A. A.; Deschamps, F.; da Silva, E. R.; Lima, E. P. de (2020): Digital twins in manufacturing: an assessment of drivers, enablers and barriers to implementation. In: Procedia CIRP 93, S. 210–215.
- [NEUM24] Neumann, F. (2024): Konzeption und Entwicklung eines digitalen Wertstromabbildes eines Wertstroms in den PTW-Lernfabriken. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- [NIYI17] Niyizamwiyitira, C.; Lundberg, L. (2017): Performance Evaluation of SQL and NoSQL Database Management Systems in a Cluster. In: International Journal of Database Management Systems 9 (6), S. 1–24.
- [OBER18] Oberhausen, C. (2018): Standardisierte unternehmensübergreifende Wertstrommethode (STREAM). Dissertation. Université du Luxembourg, Luxembourg.
- [ONAJ22] Onaji, I.; Tiwari, D.; Soulatiantork, P.; Song, B.; Tiwari, A. (2022): Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing 35, S. 1–28.
- [ÖNO13] Ōno, T. (2013): Das Toyota-Produktionssystem, Frankfurt am Main: Campus Verlag GmbH.
- [ORTE22] Ortega, I. U.; Amrani, A. Z.; Vallespir, B. (2022): Modeling: Integration of Lean and Technologies of Industry 4.0 for Enterprise Performance. In: IFAC-PapersOnLine 55 (10), S. 2067–2072.
- [OUKS99] Ouksel, A. M.; Sheth, A. (1999): Semantic Interoperability in Global Information Systems – A brief introduction to the research area and the special selection. In: SIGMOD Record 28 (1), S. 5–12.
- [PARK19] Park, H.; Easwaran, A.; Andalam, S. (2019): Challenges in Digital Twin Development for Cyber-Physical Production Systems. In: Chamberlain, R.; Taha, W.; Törngren, M. (Hrsg.): Cyber Physical Systems. Model-Based Design. Cham: Springer International Publishing, S. 28–48.

- [PART10] Partsch, H. A. (2010): Requirements-Engineering systematisch – Modellbildung für softwaregestützte Systeme, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [PATZ82] Patzak, G. (1982): Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme – Grundlagen, Methoden, Techniken, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- [PAUS18] Pause, D.; Blum, M. (2018): Conceptual Design of a Digital Shadow for the Procurement of Stocked Products. In: Moon, I.; Lee, G. M.; Park, J.; Kiritsis, D.; Cieminski, G. von (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0. IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2018, Seoul, Korea, August 26-30, 2018, Proceedings, Part II. Cham: Springer International Publishing, S. 288–295.
- [PERE19] Pereira, A.; Dinis-Carvalho, J.; Alves, A.; Arezes, P. (2019): How Industry 4.0 can enhance Lean practices. In: FME Transactions 47 (4), S. 810–822.
- [PERN22] Perno, M.; Hvam, L.; Haug, A. (2022): Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. In: Computers in Industry 134.
- [PETR21a] Petrevska, E. (2021): TCP-basierte Kommunikationsprotokolle als Schlüsseltechnologien für das IIoT – Whitepaper.
- [PETR21b] Petrik, D.; Mormul, M.; Reimann, P.; Gröger, C. (2021): Anforderungen für Zeitreihendatenbanken im industriellen IoT. In: Meinhardt, S.; Wortmann, F. (Hrsg.): IoT – Best Practices. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 339–377.
- [PFEF14] Pfeffer, M. (2014): Bewertung von Wertströmen, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [PIRE19] Pires, F.; Cachada, A.; Barbosa, J.; Moreira, A. P.; Leitao, P. (2019): Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges. In: Vyatkin, V.; Martinez Lastra, J. L.; Man, K. F. (Hrsg.): 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Helsinki: IEEE, S. 721–726.
- [PIST20] Pistorius, J. (2020): Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion – Grundlagen - Potenziale - Anwendungen, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [PLAT23] Plattform Industrie 4.0 (2023): Was ist Industrie 4.0? <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html> (Zugriff am 12.04.2024).

- [RAMA16] Ramadan, M. (2016): RFID-Enabled Dynamic Value Stream Mapping for Smart Real-Time Lean-Based Manufacturing System. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Duisburg-Essen.
- [RAMA19] Ramadan, M.; Salah, B. (2019): Smart Lean Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Case Study. In: International Journal of Industrial Manufacturing Engineering 13 (3), S. 174–181.
- [RAMM18] Rammer, C.; Jäger, A.; Krieger, B.; Lerch, C.; Licht, G.; Peters, B.; Spielkamp, A. (2018): Produktivitätsparadoxon im Maschinenbau – Studie im Auftrag der IMPULS-Stiftung, Mannheim und Karlsruhe.
- [RASH20] Rasheed, A.; San, O.; Kvamsdal, T. (2020): Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. In: IEEE Access 8, S. 21980–22012.
- [RATH21] Rathore, M. M.; Shah, S. A.; Shukla, D.; Bentafat, E.; Bakiras, S. (2021): The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities. In: IEEE Access 9, S. 32030–32052.
- [RAUT16] Rautmare, S.; Bhalerao, D. M. (2016): MySQL and NoSQL database comparison for IoT application. In: Luo, R. C.; Yu, X.; Estepa, A. L.; Ibrahim, Y. (Hrsg.): 2016 IEEE International Conference on Advances in Computer Applications (ICACA). Taipei: IEEE, S. 235–238.
- [REIN03] Reinhart, G.; Zäh, M. F.; Habicht, C.; Neise, P. (2003): Einführung schlanker Produktionssysteme. Methoden und Vorgehensweisen. In: wt Werkstattstechnik online 93, S. 571–574.
- [REIN21] Reintke, M. (2021): Ermittlung charakteristischer Aufgaben und Eigenschaften eines Wertstrommanagers. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- [RICO21] Ricondo, I.; Porto, A.; Ugarte, M. (2021): A digital twin framework for the simulation and optimization of production systems. In: Procedia CIRP 104, S. 762–767.
- [ROBI15] Robinson, I.; Webber, J.; Eifrem, E. (2015): Graph Databases – New Opportunities for connected Data, Beijing: O'Reilly.
- [ROJA22] Rojas, M. A. L.; Huamanchahua, D. (2022): The Confluence of Lean Manufacturing and Industry 4.0: A Literature Review. In: Catanon, C. B.; Egusquiza, J. C.; Salazar, J. T.; Navarro, A. (Hrsg.): 2022 IEEE ANDESCON: IEEE, S. 1–6.
- [ROME17] Romero, L. F.; Arce, A. (2017): Applying Value Stream Mapping in Manufacturing: A Systematic Literature Review. In: IFAC-PapersOnLine 50 (1), S. 1075–1086.

- [ROSI20] Rosin, F.; Forget, P.; Lamouri, S.; Pellerin, R. (2020): Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. In: *International Journal of Production Research* 58 (6), S. 1644–1661.
- [ROTH13] Rother, M. (2013): *Die Kata des Weltmarktführers – Toyotas Erfolgsmethoden*, Frankfurt, New York: Campus Verlag GmbH.
- [ROTH99] Rother, M.; Shook, J. (1999): *Learning to See – value stream mapping to add value and eliminate muda*, Brookline, Massachusetts.
- [SCHE94] Scheer, A.-W. (1994): *Prozessorientierte Unternehmensmodellierung – Grundlagen - Werkzeuge - Anwendungen*, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH.
- [SCHL19] Schleich, B.; Dittrich, M.-A.; Clausmeyer, T.; Damgrave, R.; Erkoyuncu, J. A.; Haefner, B.; Lange, J. de; Plakhotnik, D.; Scheidel, W.; Wuest, T. (2019): Shifting value stream patterns along the product lifecycle with digital twins. In: *Procedia CIRP* 86, S. 3–11.
- [SCHN19] Schneider, M. (2019): *Lean und Industrie 4.0 – Eine Digitalisierungsstrategie auf Basis des Wertstroms*, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- [SCHN20] Schneider, M. (2020): TimeScaleDB vs. influxDB: Zeitreihendatenbanken für das IIoT. <https://www.inovex.de/de/blog/timescaledb-vs-influxdb-zeitreihen-iiot/> (Zugriff am 12.04.2024).
- [SCHR19] Schröder, C. (2019): Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich – Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung aus dem Institut der deutschen Wirtschaft 46 (2).
- [SCHR20] Schreyögg, G.; Koch, J. (2020): *Management – Grundlagen der Unternehmensführung Konzepte - Funktionen - Fallstudien*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [SCHR24] Schreiber, M. (2024): *Konfiguration von Traceability-Systemen für den Einsatz von Process Mining in der diskreten Fertigung*. Dissertation, Darmstadt.
- [SCHU13] Schuh, G.; Warschat, J. (2013): *Potenziale einer Forschungsdisziplin Wirtschaftsingenieurwesen – (acatech DISKUSSION)*, München: Herbert Utz Verlag GmbH.
- [SCHU18] Schuh, G.; Prote, J.-P.; Luckert, M.; Schmidhuber, M. (2018): Potenzial von Echtzeitdaten für die Produktion - Ergebnisse einer Studie des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen. In: *wt Werkstattstechnik online* 108 (4), S. 198–203.

- [SCHU20a] Schuh, G.; Anderl, R.; Dumitrescu, R.; Krüger, A.; Hompel, M. ten (2020): Der Industrie 4.0 Maturity Index in der betrieblichen Anwendung – Aktuelle Herausforderungen, Fallbeispiele und Entwicklungstrends (acatech KOOPERATION), München.
- [SCHU20b] Schuh, G.; Anderl, R.; Dumitrescu, R.; Krüger, A.; Hompel, M. ten (2020): Industrie 4.0 Maturity Index – Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten - UPDATE 2020 - (acatech STUDIE), München.
- [SCHU20c] Schumacher, S.; Bildstein, A.; Bauernhansl, T. (2020): The Impact of the Digital Transformation on Lean Production Systems. In: *Procedia CIRP* 93, S. 783–788.
- [SCHU20d] Schuh, G.; Kelzenberg, C.; Wiese, J.; Kessler, N. (2020): Creation of digital production twins for the optimization of value creation in single and small batch production. In: *Procedia CIRP* 93, S. 222–227.
- [SCHU21] Schuh, G.; Bergweiler, G.; Chougule, M. V.; Fiedler, F. (2021): Effects of Digital Twin Simulation Modelling on a Flexible and Fixtureless Production Concept in Automotive Body Shops. In: *Procedia CIRP* 104, S. 768–773.
- [SCHÜ98] Schütte, R. (1998): Grundsätze ordnungsmäßiger Referenzmodellierung – Konstruktion konfigurations- und anpassungsorientierter Modelle, Wiesbaden: Gabler Verlag.
- [SEME21] Semeraro, C.; Lezoche, M.; Panetto, H.; Dassisti, M. (2021): Digital twin paradigm: A systematic literature review. In: *Computers in Industry* 130, S. 103469.
- [SERR08] Serrano, I.; Ochoa, C.; Castro, R. de (2008): Evaluation of value stream mapping in manufacturing system redesign. In: *International Journal of Production Research* 46 (16), S. 4409–4430.
- [SHAO20] Shao, G.; Helu, M. (2020): Framework for a Digital Twin in Manufacturing: Scope and Requirements. In: *Manufacturing letters* 24.
- [SHER23] Sherman, R. (2023): Techniken und Konzepte der Datenmodellierung für Unternehmen. <https://www.computerweekly.com/de/tipp/7-Datenmodellierungstechniken-und-konzepte-fuer-Unternehmen> (Zugriff am 12.04.2024).
- [SHOU17] Shou, W.; Wang, J.; Wu, P.; Wang, X.; Chong, H.-Y. (2017): A cross-sector review on the use of value stream mapping. In: *International Journal of Production Research* 55 (13), S. 3906–3928.
- [SILV21] Silva, D.; Carvalho, L. I.; Soares, J.; Sofia, R. C. (2021): A Performance Analysis of Internet of Things Networking Protocols: Evaluating MQTT, CoAP, OPC UA. In: *Applied Sciences* 11 (4879), S. 1–30.

- [SILV22] Silvestri, L.; Gallo, T.; Silvestri, C.; Falcone, D. (2022): Integration of Lean Manufacturing in Industry 4.0: An overview of tools and applications: 2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET): IEEE, S. 1–5.
- [SJAR20] Sjarov, M.; Lechler, T.; Fuchs, J.; Brossog, M.; Selmaier, A.; Faltus, F.; Donhauser, T.; Franke, J. (2020 - 2020): The Digital Twin Concept in Industry – A Review and Systematization. In: Sauter, T.; Vasques, F. (Hrsg.): 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): IEEE, S. 1789–1796.
- [SKOO12] Skoogh, A.; Perera, T.; Johansson, B. (2012): Input data management in simulation – Industrial practices and future trends. In: Simulation Modelling Practice and Theory 29, S. 181–192.
- [SOLD09] Solding, P.; Gullander, P. (2009): Concepts for simulation based Value Stream Mapping. In: Dunkin, A.; Ingalls, R. G. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, S. 2231–2237.
- [SPAL13] Spalt, P.; Braun, A.-T.; Schöllhammer, O. (2013): Globales Wertstrommanagement – Eine Methode zur Komplexitätsbeherrschung und kontinuierlichen Verbesserung von Wertschöpfungsnetzen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (12), S. 926–930.
- [STAC73] Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie, Wien: Springer Verlag GmbH.
- [STAN18] Stanula, P.; Ziegenbein, A.; Metternich, J. (2018): Machine learning algorithms in production: A guideline for efficient data source selection. In: Procedia CIRP 78, S. 261–266.
- [STAR19] Stark, R.; Damerau, T. (2019): Digital Twin. In: Chatti, S.; Tolio, T. (Hrsg.): CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–8.
- [STAT24a] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024): Bruttowertschöpfung nach ausgewählten Wirtschaftsbereichen in jeweiligen Preisen. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen/vgr210.html#241962> (Zugriff am 14.04.2024).
- [STAT24b] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024): Pressekonferenz "Bruttoinlandsprodukt 2023 für Deutschland". [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2024/bip2023/statement-bip.pdf?\\_\\_blob=publication-file](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2024/bip2023/statement-bip.pdf?__blob=publication-file) (Zugriff am 12.04.2024).

- [STAT24c] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024): Eckzahlen zum Arbeitsmarkt, Deutschland. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/Tabellen/eckwerttabelle.html> (Zugriff am 12.04.2024).
- [STAU16] Staufen AG; Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (2016): 25 Jahre Lean Management. Lean Gestern, Heute und Morgen, Köngen.
- [STAU19] Staufen AG (2019): Deutscher Industrie 4.0 Index 2019 – Eine Studie der Staufen AG und der Staufen Digital Neonex GmbH, Köngen.
- [STAU22] Staufen AG (2022): Green Transformation im Maschinen- und Anlagenbau – Eine Studie der Staufen AG, Köngen.
- [STAU23] Staufen AG (2023): Zukunft Industrie – Die vier Dimensionen der Wettbewerbsfähigkeit, Köngen.
- [SULL22] Sullivan, B. P.; Yazdi, P. G.; Suresh, A.; Thiede, S. (2022): Digital Value Stream Mapping: Application of UWB Real Time Location Systems. In: *Procedia CIRP* 107, S. 1186–1191.
- [TAKE14] Takeda, H. (2014): Das synchrone Produktionssystem – Just-in-time für das ganze Unternehmen, München: Franz Vahlen GmbH.
- [TEOR11] Teorey, T. J. (2011): Database modeling and design – Logical design, Burlington: Morgan Kaufmann.
- [TERI22] Teriete, T.; Böhm, M.; Sai, B. K.; Erlach, K.; Bauernhansl, T. (2022): Event-based Framework for Digitalization of Value Stream Mapping. In: *Procedia CIRP* 107, S. 481–486.
- [THRO11] Throll, M.; Bartosch, O. (2011): Einstieg in SQL – Verstehen, einsetzen, nachschlagen ; [mit Praxisbeispielen, Aufgaben und Übungen ; SQL-Syntax von MySQL, MS Access, PostgreSQL, MS SQL Server, Base, Oracle, DB, SQLite und Firebird ; inkl. Referenzkarte mit SQL-Syntax ; CD-ROM perfekt zum Selbststudium: Übungssoftware, SQL-Teacher, Bonn: Galileo Press.
- [TIGH20] Tightiz, L.; Yang, H. (2020): A Comprehensive Review on IoT Protocols' Features in Smart Grid Communication. In: *Energies* 13 (11).
- [TIME24a] Timescale Inc. (2024): Why Timescale? Built for developers, trusted by businesses – A PostgreSQL cloud platform engineered for your most demanding data needs. Built for scale, speed, and savings. <https://www.timescale.com/products#enjoyPostgres> (Zugriff am 12.04.2024).
- [TIME24b] Timescale Inc. (2024): About hypertables. <https://docs.timescale.com/use-timescale/latest/hypertables/about-hypertables/> (Zugriff am 12.04.2024).



- [TOMC92] Tomczak, T. (1992): Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft: Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz. In: *Marketing: ZFP - Journal of Research Management* 14 (2), S. 77–87.
- [TREB19] Trebuna, P.; Pekarcikova, M.; Edl, M. (2019): Digital Value Stream Mapping Using the Tecnomatix Plant Simulation Software. In: *International Journal of Simulation Modelling* 18 (1), S. 19–32.
- [TRUI15] Truica, C.-O.; Radulescu, F.; Boicea, A.; Bucur, I. (2015): Performance Evaluation for CRUD Operations in Asynchronously Replicated Document Oriented Database: 2015 20th International Conference on Control Systems and Computer Science: IEEE, S. 191–196.
- [TSCH15] Tschöpe, S.; Aronska, K.; Nyhuis, P. (2015): "Was ist eigentlich Industrie 4.0?" – Eine quantitative Datenbankanalyse liefert einen Einblick. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (3), S. 145–149.
- [TÜRRC14] Türk, S.; Weimer, A.; Schubert, L.; Drees, J. (2014): Dynamische Simulation von Wertströmen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (11), S. 839–842.
- [UHLE17a] Uhlemann, T. H.-J.; Schock, C.; Lehmann, C.; Freiberger, S.; Steinhilper, R. (2017): The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 113–120.
- [UHLE17b] Uhlemann, T. H.-J.; Lehmann, C.; Steinhilper, R. (2017): The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. In: *Procedia CIRP* 61, S. 335–340.
- [ULRI76] Ulrich, P.; Hill, W. (1976): Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). In: *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium* (7), S. 304–309.
- [ULRI84] Ulrich, H. (1984): *Management*, St. Gallen: Verlag Paul Haupt Bern und Stuttgart.
- [URIA18] Uriarte, A. G.; Ng, A. H.; Sellgren, T.; Moris, M. U. (2018): Introducing simulation and optimization in the lean continuous improvement standards in an automotive company. In: Rabe, M.; Juan, A. A.; Johansson, B.; Jain, S.; Rose, O.; Uhrmacher, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference (WSC)*. M. Rabe, A.A. Juan, N. Mustafee, A. Skoogh, S. Jain, and B. Johansson, eds.: IEEE, S. 3352–3363.
- [URNA19] Urnauer, C.; Kaiser, J.; Gunkel, M.; Metternich, J. (2019): Multidimensional Assessment of Value Stream Design Alternatives. In: *Procedia CIRP* 86, S. 264–269.

- [URNA23a] Urnauer, C.; Rudolph, L.; Metternich, J. (2023): Evaluation of Clustering Approaches and Proximity Measures for Product Family Identification. In: *Procedia CIRP* (in press).
- [URNA23b] Urnauer, C. (2023): *Data Analytics in der Analyse und Gestaltung von Wertströmen*. Dissertation, Darmstadt: Shaker Verlag.
- [VALA20] Valamede, L. S.; Santos Akkari, A. C. (2020): Lean Manufacturing and Industry 4.0: A Holistic Integration Perspective in the Industrial Context. In: *2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management*, S. 63–68.
- [VAN 16] van der Aalst, W. M. P. (2016): *Process Mining – Data Science in Action*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [VAN 21] van den Brand, M.; Cleophas, L.; Gunasekaran, R.; Haverkort, B.; Negrin, D. A. M.; Muctadir, H. M. (2021): Models Meet Data: Challenges to Create Virtual Entities for Digital Twins. In: David, I.; Syriani, E.; Garcia-Dominguez, A. (Hrsg.): *2021 ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C)*, S. 225–228.
- [VDI12] Verein Deutscher Ingenieure (2012): *VDI 2870: Ganzheitliche Produktionssysteme: Grundlagen, Einführung und Bewertung*. VDI.
- [VDI16] Verein Deutscher Ingenieure (Mai 2016): *VDI-Richtlinien VDI 4465 Blatt 1 – Modellierung und Simulation - Modellbildungsprozess*.
- [VICK10] Vicknair, C.; Macias, M.; Zhao, Z.; Nan, X.; Chen, Y.; Wilkins, D. (2010): A Comparison of a Graph Database and a Relational Database – A Data Provenance Perspective. In: Cunningham, H. C.; Ruth, P.; Kraft, N. A. (Hrsg.): *Proceedings of the 48th Annual Southeast Regional Conference*. New York, NY, USA: ACM, S. 1–6.
- [WAGN17] Wagner, T.; Herrmann, C.; Thiede, S. (2017): Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems. In: *Procedia CIRP* 63, S. 125–131.
- [WAGN18] Wagner, T.; Herrmann, C.; Thiede, S. (2018): Identifying target oriented Industrie 4.0 potentials in lean automotive electronics value streams. In: *Procedia CIRP* 72, S. 1003–1008.
- [WAGN19] Wagner, R.; Schleich, B.; Haefner, B.; Kuhnle, A.; Wartzack, S.; Lanza, G. (2019): Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products. In: *Procedia CIRP* 84, S. 88–93.
- [WAND96] Wand, Y.; Wang, R. Y. (1996): Anchoring data quality dimensions in ontological foundations. In: *Communication of the ACM* 39 (11), S. 86–95.

- [WANG96] Wang, R. Y.; Strong, D. M. (1996): Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers. In: *Journal of Management Information System* 12 (12), S. 5–33.
- [WEST14] Westkämper, E. (2014): Global “Megatrend’s” Grand Societal Challenges. In: Westkämper, E. (Hrsg.): *Towards the Re-Industrialization of Europe*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 17–22.
- [WILD04] Wildemann, H. (2004): Präventive Handlungsstrategien für den Produktionsanlauf. In: *Industrie Management* 20 (4), S. 17–20.
- [WILD20] Wildemann, H. (2020): *Produktivität durch Industrie 4.0*, München: TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG.
- [WINK17] Winkler, H.; Lugert, A. (2017): *Die Wertstrommethode im Zeitalter von Industrie 4.0 – Studienreport*, Cottbus: BTU Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg.
- [WOLL22] Wollert, T.; Behrendt, F. (2022): Future Application of VSM in Digitalized Environments. In: Glistau, E.; Trojahn, S. (Hrsg.): *15th International Doctoral Students Workshop on Logistics, June 23, 2022 Magdeburg*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, S. 90–97.
- [WOMA90] Womack, J. P.; Jones, D. T.; Roos, D. (1990): *The machine that changed the world*, New York.
- [WOMA97] Womack, J. P.; Jones, D. T. (1997): *Auf dem Weg zum perfekten Unternehmen – (Lean Thinking)*, Frankfurt am Main: Campus Verlag GmbH.
- [YAFO13] Yafooz, W. M.; Abidin, S. Z.; Omar, N.; Idrus, Z. (2013): Managing Unstructured Data in Relational Databases. In: Taib, M. N.; Jailani, R. (Hrsg.): *Proceeding of the 2013 IEEE Conference on Systems, Process & Control (ICSPC)*: IEEE, S. 198–203.



**ANHANG**

**A.1 Symbole der Wertstrommethode**

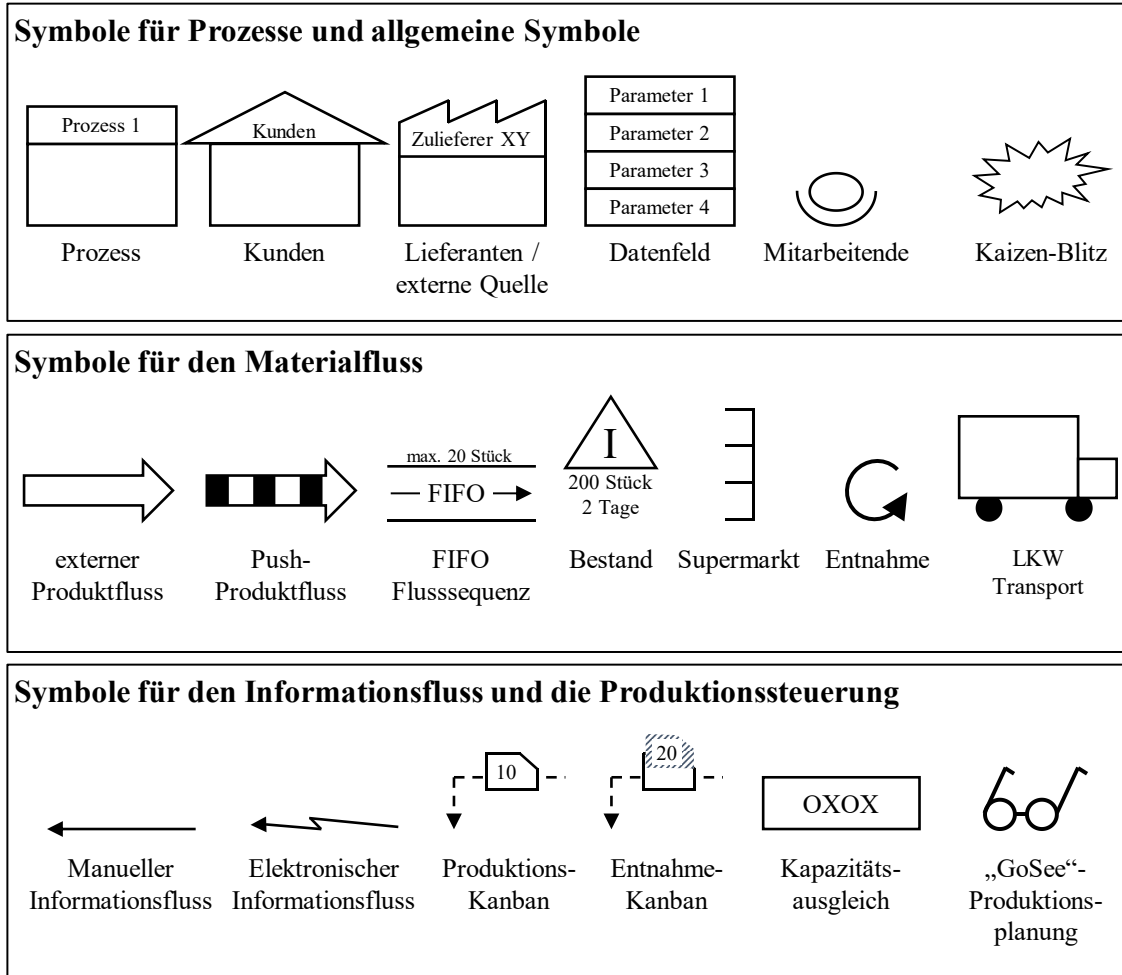


Abbildung 60: Auswahl relevanter Wertstromsymbole (Eigene Darstellung in Anlehnung an [DIN20, HART21])

## A.2 Dokumentation systematische Literaturanalyse

### Suchbegriffe:

**Gruppe A:** „lean“, „value stream“, „wertstrom\*“

**Gruppe B:** „management“

**Gruppe C:** „ability“, „competence“, „function“, „requirement“, „skill“, „task“, „Fähigkeit“, „Eigenschaft“, „Kompetenz“, „Funktion“, „Aufgabe“

### Dokumentation der systematischen Literaturanalyse:

Tabelle 18: Ergebnisse systematische Literaturanalyse (in Anlehnung an [REIN21])

Ausschlusskriterium	Datenbank							Anzahl Gesamt
	Science Direct	TecFinder BEFO	Web of Science	IEEE Explore	EBSCOhost	WISO	Taylor & Francis	
<b>Gesamtanzahl</b>	<b>144</b>	<b>549</b>	<b>598</b>	<b>550</b>	<b>219</b>	<b>94</b>	<b>739</b>	<b>2890</b>
Paper nicht im Kontext der WSM	77	461	459	469	182	64	674	<b>504</b>
Paper nicht im Kontext der Produktionswirtschaft	33	60	109	65	18	11	27	<b>181</b>
Paper nicht zugänglich	18	20	15	7	0	1	21	<b>99</b>
Keywords entsprechen nicht den Suchbegriffen	0	1	0	0	0	0	0	<b>98</b>
Kein wissenschaftlicher Standard	0	1	0	0	0	14	0	<b>83</b>
Fremdsprache	4	0	0	0	13	0	10	<b>56</b>
<b>Anzahl nach Selektion</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>56</b>
Redundanzen				- 7				<b>49</b>
Schneeballsuche				+ 16				<b>56</b>
Volltextanalyse				- 23				<b>42</b>

## Identifizierte Publikationen im Rahmen der systematischen Literaturanalyse:

Tabelle 19: Literatur zur Identifikation der Aufgaben des Wertstrommanagements (in Anlehnung an [REIN21])

<b>Autor:innen</b>	<b>Jahr</b>	<b>Titel</b>
Ahmad et al.	2018	Alberta Learning Factory for training reconfigurable assembly process value stream mapping
Balaji et al.	2020	DVSMS: dynamic value stream mapping solution by applying IIoT
Balsliemke	2015	Kostenorientierte Wertstromplanung
Báthory	2020	Qualitative study on the value stream-based organisation: lessons from hungarian production plants
Bunse et al.	2010	Organisationsstruktur für eine schlanke Produktion
Cruz-Machado und Pereira	2008	Modelling Lean Performance
Durchholz und Boppert	2013	Schlanke Logistikprozesse
Erlach	2010	Wertstromdesign Der Weg zur schlanken Fabrik
Faisal und Ravi	2018	Simulation Modeling and Analysis for the implementation of Total Quality Management using Value Stream Mapping in Labourintensive Small and Medium-sized Enterprises
Gelei et al.	2015	Lean production and leadership attributes – the case of Hungarian production managers
Göpfert et al.	2017	Automobillogistik -Mit kostenorientierter Wertstromplanung zu schlanker Logistik
Hines et al.	1998	Value Stream Management
Klevers	2013	Wertstrommanagement mehr Leistung und Flexibilität für Unternehmen
Kregel et al.	2019	Competency profiles for lean professionals – an international perspective
Kuhlang et al.	2014	Enhancing Work System Design and Improvement by Further Developments of Value Stream Mapping
Lugert	2019	Dynamisches Wertstrommanagement im Kontext von Industrie 4.0
Lugert und Winkler	2017	Von der Wertstromanalyse zum Wertstrommanagement
Lugert et al.	2018	Empirical assessment of the future adequacy of value stream mapping in manufacturing industries
Lugert et al.	2018	Dynamization of Value Stream Management by technical and managerial approach
Oberhausen und Plapper	2017	Cross-Enterprise Value Stream Assessment
Oberhausen et al.	2017	Standardized Value Stream Management Method to Visualize, Analyze and Optimize Cross-Enterprise Value Stream Data
Oberhausen et al.	2017	Continuous Improvement of Complex Process Flows by Means of Stream as the “Standardized Cross-Enterprise Value Stream Management Method”
Olivella und Gregorio	2014	Organizational practices lean enterprises adopt to focus on value streams
Olivella Nadal	2017	Lean Management and Supply Chain Management: Common Practices
Peek und Chen	2011	Promoting Innovations in a Lean Organization through Innovative Value Stream Mapping
Poksinska et al.	2013	The daily work of Lean leaders – lessons from manufacturing and healthcare
Rother und Baboli	2019	Lean Manager in the Factory of the Future
Rother und Shook	1998	Learning to See VSM to add value and eliminate muda
Salma et al.	2018	How can Top management succeed in a lean manufacturing implementation in the small and medium sized enterprises?
Schneider	2019	Die Digitalisierungsstrategie für Lean-Unternehmen –Ableitung mit Hilfe der Wertstrommethode 4.0: Ein wertstrombasiertes Gesamtkonzept für Ihr Unternehmen – Lean Factory Design
Serrano Lasa et al.	2009	Extent of the use of Lean concepts proposed for a value stream mapping application
Shinkle	2005	In search of Lean Management
Siekmann et al.	2018	Implementation of lean production systems in small and medium sized pharmaceutical enterprises
Stowasser	2012	Changemanagement Praxisfälle
Sunk et al.	2016	Developments of traditional value stream mapping to enhance personal and organisational system and methods competencies
Tapping et al.	2005	Value stream management for the lean office: 8 steps to planning, mapping and sustaining lean improvements in administrative areas
Taylor	2009	An application of value stream management to the improvement of a global supply chain: a case study in the footwear industry
Thomann	2007	Der Qualitätsmanagementberater -Wertstromdesign-
Tortorella et al.	2020	Designing lean value streams in the fourth industrial revolution era: proposition of technology-integrated guidelines
van Dun et al.	2017	Values and behaviors of effective lean managers: Mixed-methods exploratory research
Villalba-Diez et al.	2015	Attaining Value Stream alignment within Complex Organizational Networks
Wiegand	2016	Produktiver mit Kanban und Fluss-Prinzip - Lean Management-Methoden sorgen für kontinuierlichen Fluss in der Produktion-

### A.3 Leitfaden des Expert:innen-Interviews mit Begleitfragen

Tabelle 20: Leitfaden mit Begleitfragen (in Anlehnung an [REIN21])

<b>1. Begrüßung und Expert:innenqualifikation (ca. 10 Minuten)</b>
<p>1.1. Begrüßung/Vorstellung des Interviewers</p> <p>1.2. Hinweise zum Ablauf des Interviews und der vorgesehenen Dauer</p> <p>1.3. Information zur Verwendung und Freigabe der Daten und Einverständniserklärung</p> <p>1.4. Abfrage Qualifikation der Expert:innen</p>
<b>2. Allgemeines zum Wertstrommanagement und Wertstrommanager:in (ca. 15 Minuten)</b>
<p>2.1. Vorstellung der Definitionen zu Wertstrommanagement und Wertstrommanager:innen</p> <p>2.2. Welche Meinung vertreten Sie bzgl. der vorgestellten Definition der Wertstrommanager:innen?</p> <p>2.3. Welche Stellung im Organigramm einer Organisation sollte Ihrer Ansicht nach ein:e Wertstrommanager:in einnehmen?</p>
<b>3. Aufgaben der Wertstrommanager:innen (ca. 20 Minuten)</b>
<p>3.1. Vorstellung Aufgabenebenen im Wertstrommanagement (Aufgaben und Routinetätigkeiten, langfristige Planungsaufgaben und mittelfristige Maßnahmen)</p> <p>3.2. Welche langfristigen Aufgaben hinsichtlich der Wandlungsfähigkeit des Wertstroms würden Sie den Wertstrommanager:innen zuschreiben?</p> <p>3.3. Welche mittelfristigen Planungsaufgaben bezüglich der Gestaltung der Flexibilität des Wertstroms fallen in das Ressort der Wertstrommanager:innen?</p> <p>3.4. Welchen Routineaufgaben / Aufgaben (täglich) muss sich Ihrer Meinung nach ein:e Wertstrommanager:in stellen?</p>
<b>4. Eigenschaften der Wertstrommanager:innen (ca. 20 Minuten)</b>
<p>4.1. Vorstellung Lean Leadership Attribute, Werte von Lean Profis / Lean Manager:innen</p> <p>4.2. Können Sie bestätigen, dass die vorgestellten Attribute übertragbar auf die Wertstrommanager:innen sind und ob dabei eine spezielle Ausprägungsstufe vorliegt?</p> <p>4.3. Welche Ableitung von Eigenschaften können Sie aus Ihren genannten Aufgaben ziehen?</p> <p>4.4. Welcher Führungsstil ist für die Funktionsweise der Wertstrommanager:innen wegweisend?</p> <p>4.5. Was muss Ihrer Meinung nach vorab mit in die Rolle der Wertstrommanager:innen eingebracht werden? Welche Voraussetzungen würden Sie erwarten oder fordern?</p> <p>4.6. Welche spezifischen Persönlichkeitsmerkmale muss Ihrer Auffassung nach ein:e Wertstrommanager:in für die Ausführung Ihrer Aufgaben mit sich bringen?</p>



## A.4 Strukturierter Fragebogen zur Bestimmung der Gestaltungselemente

Tabelle 21: Strukturierter Fragebogen zur Bestimmung der Gestaltungselemente

Gestaltungselemente	Auswahlmöglichkeiten					
	Nicht wichtig	Eher nicht wichtig	Neutral	Eher wichtig	Wichtig	Keine Angabe
<b>Echtzeitdaten des Wertstroms</b> Die Daten des physischen Wertstroms werden in Echtzeit an den Digitalen Zwilling übertragen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Multimodale Datenaufnahme</b> Die aufgenommenen Daten stammen aus verschiedenen Quellen, z. B. Sensordaten, Maschinendaten, Prozessdaten, Daten aus IT-Systemen (ERP-, MES-System) etc.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Historische Datenspeicherung</b> Die Daten werden gespeichert und stehen für eine spätere Analyse / Verwendung zur Verfügung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Datenmodell des Wertstroms</b> Ein wertstromspezifisches Datenmodell ist vorhanden. Es beschreibt die unterschiedlichen Daten des Anwendungsbereiches sowie die Beziehungen untereinander. Dieses ist als Voraussetzung für die Datenanalyse notwendig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Datenvalidität, -konsistenz und -qualität</b> Die Daten werden einem Qualitäts- und Konsistenzcheck unterzogen, um ihre Validität sicherzustellen. Dies beinhaltet die eindeutige Zuordnung der Daten zu ihrem Ursprung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Anwendungsspezifische Datengranularität</b> Die Auswahl eines anwendungsspezifischen Detaillevels sowie der anwendungsspezifischen relevanten Daten ist möglich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Datenverarbeitung</b> Es findet eine Auswertung des aktuellen Zustands des Wertstroms mittels Data Analytics statt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Smart Data</b> Es findet eine Vorverarbeitung der Rohdaten statt. Die Rohdaten werden nicht gespeichert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Standardisierte Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle</b> Die Verbindung zwischen physischer Ebene – dem Wertstrom – und der digitalen Ebene – dem Digitalen Zwilling – basiert auf offenen und standardisierten Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Automatisierte Informationsrückführung</b> Closed Loop – Automatisierte Rückführung der Daten des Digitalen Zwillings in den physischen Wertstrom; z. B. optimierte Prozessdaten, sodass keine menschliche Entscheidungsinstanz zwischen geschaltet ist.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>System bietet lediglich eine Entscheidungsunterstützung an</b> Das System bietet lediglich Verbesserungsvorschläge. Die finale Entscheidung, ob eine Änderung am Prozess vorgenommen werden soll, bleibt beim Menschen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Sensorintegration auf dem Shopfloor-Level</b> Die erzeugten Daten basieren ausschließlich auf implementierter Sensorik.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Einbindung von bestehenden IT-Systemen</b> Die erzeugten Daten basieren ausschließlich auf bestehenden IT-Systemen, wie ERP-, MES-, BDE-Systemen etc.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Visualisierung des Wertstroms</b> Die Visualisierung der Daten für den spezifischen Anwendungsfall ermöglicht es, gezielt Entscheidungen zu treffen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Möglichkeit zur Durchführung von Simulationen</b> Das System bietet die Möglichkeit, Simulationen durchzuführen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Handlungsvorschläge für Verbesserungen</b> Das System liefert automatisiert Verbesserungsvorschläge für bspw. einzelne Prozessschritte und deren spezifischen Kennzahlen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Gibt es aus Ihrer Sicht weitere Gestaltungselemente, die neben den abgefragten Elementen für die praktische Umsetzung eines Digitalen Zwillings für Wertströme berücksichtigt werden müssen?</b>						

## A.5 Übersicht Datentypen

Nachfolgend findet sich eine Übersicht über typische Datentypen im Kontext der Datenmodellierung sowie eine Erläuterung für die Auswahl der Datentypen [KLIP23].

Tabelle 22: Übersicht unterschiedlicher Datentypen (in Anlehnung an [KLIP23])

	Datentyp	Beschreibung	Speicher	Definitionsbereich	
				von	bis
Zeichenketten	varchar(n)	Zeichenkette variabler Länge mit Limit	max. 1GB	1 Zeichen	bis zu 10485760 Zeichen
	char(n)	Zeichenkette vorgegebener Länge, blanko aufgefüllt	max. 1GB	1 Zeichen	bis zu 10485760 Zeichen
	text	Zeichenkette variabler Länge ohne Limit	max. 1GB	1 Zeichen	limitiert durch 1 GB Speicher
Numerisch	smallint	Ganzzahl	2 Byte	-32768	+32767
	integer	Ganzzahl	4 Byte	-2147483648	+2147483647
	bigint	Ganzzahl	8 Byte	$<-9*10^{18}$	$>9*10^{18}$
	smallserial	autoinkrementierende Ganzzahl	2 Bytes	1	32767
	serial	autoinkrementierende Ganzzahl	4 Bytes	1	2147483647
	bigserial	autoinkrementierende Ganzzahl	8 Bytes	1	$>9*10^{18}$
	real	Gleitkommazahl	4 Bytes	6 Dezimalstellen	
	float	Gleitkommazahl	8 Byte	15 Dezimalstellen	
Zeitstempel	timestamp	Datum & Uhrzeit	8 Byte	YYYY-MM-DD HH:MM:DD	
	timestampz	Datum & Uhrzeit (UTC)	8 Byte	YYYY-MM-DD HH:MM:DD +00	

- **Zeichenketten:** Für Attribute, welche nicht ausschließlich Zahlen enthalten, empfiehlt sich der Datentyp *text*. Dieser ist den Datentypen *varchar(n)* und *char(n)* hinsichtlich der Flexibilität überlegen, da keine maximale Länge für die Attribute definiert werden muss. Gleichzeitig besitzt er keine Nachteile bzgl. des notwendigen Speicherplatzes.
- **Ganzzahl:** Für ganzzahlige Attribute, wie bspw. Teilenummern oder Lieferanten-IDs, empfiehlt sich der Datentyp *integer*.
- **Gleitkommazahl:** Für die Darstellung von Dezimalzahlen, bspw. Energieverbrauchsdaten, empfiehlt sich der Datentyp *float*, da dieser im Vergleich zum Datentyp *real* eine höhere Genauigkeit ermöglicht.
- **Zeitstempel:** Für Zeitstempel-Attribute empfiehlt sich der Datentyp *timestampz*, da dieser die ermittelten Zeiten automatisch in UTC (Universal Time Coordinated) umrechnet und die Vergleichbarkeit bei globalen Wertströmen mit Zeitzonenumwechslern gewährleistet.

### A.6 Beispiele Normalisierung

**Erste Normalform:** Sich wiederholende Gruppen werden entfernt, indem mehrwertige Attribute in separate Tabellen überführt werden. Weiterhin enthält jedes Attribut atomare (einfache) Werte.

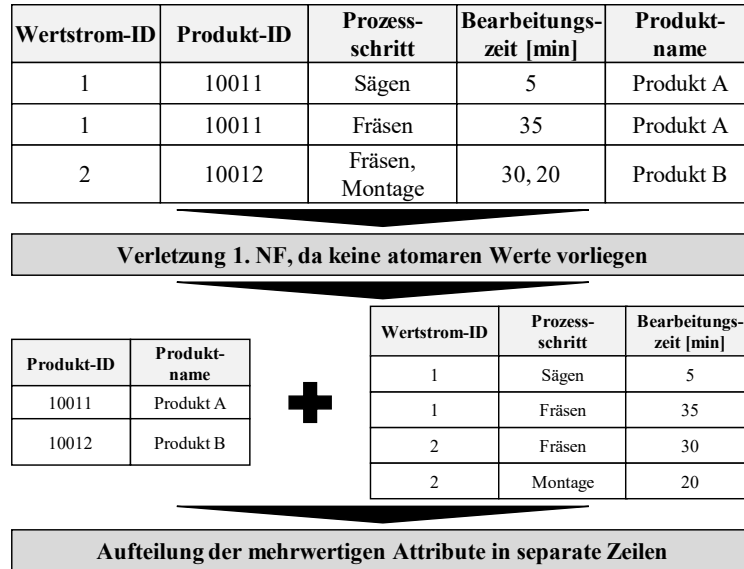


Abbildung 61: Beispiel Erste Normalform

**Zweite Normalform:** Alle Nicht-Schlüsselattribute müssen voll funktional vom Primärschlüssel abhängen, sodass teilweise Abhängigkeiten vermieden werden. Besteht der Primärschlüssel aus lediglich einem Attribut, ist eine teilweise Abhängigkeit unmittelbar ausgeschlossen.

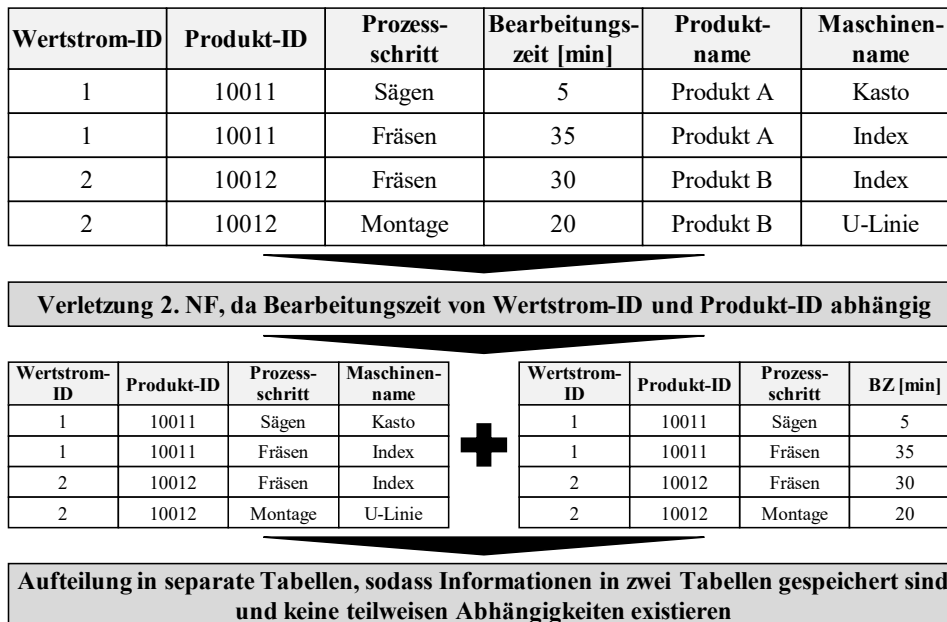


Abbildung 62: Beispiel Zweite Normalform

**Dritte Normalform:** Es muss sichergestellt werden, dass keine transitiven Abhängigkeiten zwischen Nicht-Schlüsselattributen existieren, d. h., ein Attribut ist nicht von einem anderen Nicht-Schlüsselattribut abhängig, sondern ausschließlich vom Primärschlüssel.

Bestellungs-ID	Kunde	Produkt	Produkt-kategorie
123456	Kunde A	Produkt X	Pneumatik
987654	Kunde B	Produkt Y	Hydraulik
131292	Kunde B	Produkt Z	Hydraulik

**Verletzung 3. NF, Produktkategorie funktional von Produkt abhängig, aber nicht von Bestellungs-ID**

Bestellungs-ID	Produkt-ID	Produkt
123456	Kunde A	Produkt X
987654	Kunde B	Produkt Y
131292	Kunde B	Produkt Z

+

Produkt	Produkt-kategorie
123456	Pneumatik
987654	Hydraulik
131292	Hydraulik

**Aufteilung in separate Tabellen, sodass Redundanzen eliminiert werden**

Abbildung 63: Beispiel Dritte Normalform

## A.7 Übersicht Datenbanktypen

Tabelle 23: Bewertung unterschiedlicher Datenbanktypen zur Darstellung eines Wertstroms

Kriterien	Datenbanktypen			
	Relationale Datenbank	Zeitreihendatenbank	Dokumentenorientierte Datenbank	Graphdatenbank
	Quellen	Quellen	Quellen	Quellen
<b>Universalität</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vielseitig einsetzbar</li> <li>- Gut geeignet für komplexe Abfragen und Transaktionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eingeschränkte Anwendbarkeit bei nicht-zeitbasierten Daten</li> <li>- Ideal bei Anwendungsfällen wie Condition Monitoring</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexible Datenspeicherung</li> <li>- Gut geeignet, wenn das Modell partitioniert werden kann</li> <li>- Ideal für datenintensive Anwendungen mit variabler Struktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Auf die Analyse von Beziehungen zwischen Datenpunkten spezialisiert</li> <li>- jeder Hersteller besitzt eigene API</li> </ul>
<b>Skalierbarkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vertikale Skalierbarkeit (Hinzunahme von Hardware) möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Höchste Skalierbarkeit, da Datenbanken Echtzeitanforderungen gerecht werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Horizontale Skalierbarkeit durch Verketten von Computern zur Performancesteigerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Horizontale Skalierbarkeit, da das Graphenmodell leicht erweiterbar ist</li> </ul>
<b>Kompatibilität</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einheitliche Datenbanksprache (SQL)</li> <li>- Bietet APIs für Programmiersprachen zur Integration in Anwendungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine universelle Datenbanksprache</li> <li>- Zeitreihendaten in spezifischem Format gespeichert (metrische Namen, Zeitstempel und Werte)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formate wie JSON, PDF, XML etc. werden unterstützt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Graphdatenbanken nutzen unterschiedliche Datenbanksprachen</li> </ul>
<b>Latenz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Latenz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sehr geringe Latenz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schnelle Lesegriffe möglich</li> <li>- Latenz steigt mit zunehmender Datenmenge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sehr effizient bei Beziehungsabfragen</li> </ul>
<b>Erlernbarkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umfangreiche Dokumentation, dadurch leicht erlernbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufgrund Fokussierung auf Zeitreihendaten einfach erlernbar</li> <li>- Aufwand für andere Programmiersprache muss berücksichtigt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- API-ähnliches Interface ermöglicht Erlernbarkeit</li> <li>- Teilweise unterschiedliche Datenbanksprachen zwischen den Systemen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erlernbarkeit wird durch übersichtliche APIs erleichtert</li> <li>- Wechsel zwischen graphenbasierten Datenbankmanagementsystemen schwierig</li> </ul>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Universelle Anwendbarkeit für viele Anwendungsfälle</li> <li>- Umfangreicher Community-Support</li> <li>- Datenintegrität und -konsistenz durch ACID-Eigenschaften</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zeitreihendaten werden nicht überschrieben, so dass historischer Verlauf dokumentiert wird</li> <li>- Echtzeitanalysen sind möglich</li> <li>- Vollständiges Bild des Systems durch Trenderkennung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Möglichkeit der Speicherung von un- bzw. halbstrukturierten Daten</li> <li>- Skalierbar aufgrund verteilter und flexibler Struktur</li> <li>- Gute Unterstützung für Anwendungen mit variablen oder sich ändernden Datenmodellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ideal für Modellierung von Beziehungen in Netzwerken</li> <li>- Abfragen zu den Beziehungen sehr effizient</li> <li>- Einfache Erweiterbarkeit für neue Beziehungen und Relationen</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Skalierbarkeit bei großen Datenmengen eine Herausforderung</li> <li>- Ineffizient bei unstrukturierten oder variablen Daten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eingeschränkte Anwendbarkeit bei nicht-zeitbasierten Daten</li> <li>- Hoher Datenumfang</li> <li>- Keine Modifikation der Daten im Nachhinein</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Weniger effizient, wenn Anwendung auf komplexe Abfragen ausgerichtet ist</li> <li>- Erlernen spezifischer Dokumentenmodelle und -abfragesprachen wird vorausgesetzt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nicht effizient für nicht-beziehungsorientierte Abfragen</li> <li>- Zeitaufwändige Erlernung der Graphenkonzepte</li> </ul>
<b>Beispiele</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MySQL</li> <li>- PostgreSQL</li> <li>- SQLite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- InfluxDB</li> <li>- OpenTSDB</li> <li>- Prometheus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MongoDB</li> <li>- CouchDB</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Neo4j</li> <li>- Amazon Neptune</li> <li>- OrientDB</li> </ul>
<b>Eignung Wertstromdarstellung</b>	ja	ja	nein	nein

## A.8 Softwarelösungen für die digitale Darstellung eines Wertstroms

Tabelle 24: Softwarelösungen für die digitale Darstellung eines Wertstroms

Nr.	Unternehmen	Name des Visualisierungstool	Kategorie
1	BreezeTree Software LLC	FlowBreeze - Value Stream Mapping Tool	Wertstrom-Visualisierung
2	Edrawsoft	Edraw - Value stream mapping tool	
3	iFakt GmbH	Polaris VSM	
4	Lucid Software Inc.	Lucidchart	
5	Microsoft Corporation	Microsoft Visio	
6	Miro	Miro - Value Stream Map	
7	ONIQ GmbH	IQA - Digital Value Stream Twin	
8	plavis GmbH	Vistalbe - Wertstromanalyse Software	
9	Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.	Tecnomatrix Plant Simulation	
10	SimPlan AG	SimVSM	
11	Visual Paradigm	Visual Paradigm - Wertstromanalyse Software	
12	fLUMINA GmbH	fLUMEN-E	IoT-Plattform
13	GFT Integrated Systems GmbH	Sphinx Open Online	
14	Robert Bosch Manufacturing Solutions GmbH	Nexeed Industrial Application System	
15	Synchrone Inc.	Demand-Driven Manufacturing Platform	
16	Tulip Interfaces Inc.	Tulip	
17	3d Signals GmbH	dView	Business Intelligence-Tool
18	Böhme & Weihs Systemtechnik GmbH & Co. KG	MESQ-it	
19	Capstone Technology	dataPARC	
20	DAPONA AG	DAPONA	
21	elunic AG	shopfloor.io	
22	Evocon	Evocon	
23	Microsoft Corporation	Microsoft Power BI	
24	Peakboard GmbH	Peakboard Designer und Peakboard Box	
25	Planview GmbH	Planview - Value Stream Management Software	
26	Plutora	Plutora - Value Stream Management Platforms	
27	Solunio GmbH	Visual Shop Floor	
28	ThingsBoard Inc.	ThingsBoard	
29	UWS Business Solutions GmbH	Leanion Cloud One	
30	Grafana Labs	Grafana	

## A.9 Übersicht Kommunikationsprotokolle

Tabelle 25: Übersicht über Kommunikationsprotokolle und deren Eigenschaften 1/2

Kommunikationsprotokolle	Eigenschaften				Quellen
	Interoperabilität	Sicherheit	Skalierbarkeit	Quellen	
<b>OPC UA</b>	Geräte nutzen die gleichen Typen und Dienste (syntaktisch einheitliche Namenskonvention (semantisch))	Unterstützt eine robuste, sichere Kommunikation, die die Identität von Clients und Servern gewährleistet.	Nach oben und unten skalierbar. OPC UA sowohl für kleinere Anwendungen als auch für große Systeme geeignet.	[SILV21]	[PETR21a, LADE22]
<b>MQTT</b>	Keine syntaktische oder semantische Standardisierungsebene	Ist bei MQTT implementierungsabhängig, kann aber Transport Layer Security (TLS) berücksichtigen.	Schwierig, da Daten sich am Broker stauen und der Broker somit als Single Point of Failure fungiert. Je mehr Subskriber, desto mehr Messages muss der Broker senden.	[PETR21a]	[AL-M20]
<b>CoAP</b>	Semantische Interoperabilität	CoAP selbst bietet keine Sicherheit, wird aber durch das Datagram Transport Layer erreicht, das im IoT-Bereich nicht weit verbreitet ist.	Gut skalierbar, da dezentraler Ansatz wie DDS	[AL-M20]	[AL-M20]
<b>DDS</b>	Semantische Interoperabilität, Device-to-Device Communication	Hoch, da dezentrale Kommunikation	Sehr gut skalierbar	[SILV21]	[AL-M20]
<b>REST</b>	RESTful-Schnittstellen bieten verschiedene syntaktische Standardisierungsmöglichkeiten wie OpenAPI, RAML, API und Blueprint.	Bietet selbst keine Sicherheitsmechanismen, sondern verlässt sich auf die zugrundeliegende Transportschicht.	Bei zu vielen Abfragen kann das Netz überlastet werden.	[PETR21a]	[PETR21a]
<b>HTTP</b>	Semantische Interoperabilität	HTTPS über TLS	Keine einfache Skalierbarkeit möglich	[AL-M20]	[AL-M20]
<b>XMPP</b>	Anwendungsgebiet begrenzt auf XMPP-Server für Messaging-Dienste	Schwachstellen ermöglichen den ungewollten externen Zugriff.	Gut skalierbar aufgrund des XML-Datenformat	[AL-M20]	[AL-M20]
<b>AMQP</b>	Syntaktische Interoperabilität auf der Ebene von Datentypen	TLS bietet die Übertragungssicherheit.	Gut skalierbar	[AL-M20, PETR21a]	[AL-M20]

Tabelle 26: Übersicht über Kommunikationsprotokolle und deren Eigenschaften 2/2

Kommunikationsprotokolle	Geschwindigkeit und Latenz	Eigenschaften			Integration bestehender Systeme	Quellen
		Kosten / Implementierungsaufwand	Quellen	Quellen		
<b>OPC UA</b>	Im Vergleich zu MQTT und CoAP eine höhere time-to-completion-Rate	Hohe, wenn es um den Aufbau eines vollständigen Informationsmodells geht	[SILV21]	[PETR21a]	Grundsätzlich von ERP bis zur Steuerungsebene (SPS oder PLC) alle Systeme über OPC UA vernetzbar	[BABE23]
<b>MQTT</b>	Geringe Latenz, aber höhere Latenz als CoAP bei erhöhter Nachrichtenmenge	Geringe Kosten, einfach zu implementieren, da Open Source Broker verfügbar sind	[SILV21]	[BAY122]	Benötigt keine hohe Bandbreite, daher für verteilte Sensoren geeignet	[TIGH20]
<b>CoAP</b>	Geringe Latenz, CoAP hat die geringste durchschnittliche Verzögerung pro Paket	Erhöhte Kosten durch hohen Implementierungsaufwand	[AL-M20, BAY122]	[AL-M20]	Gut anwendbar bei Geräten mit begrenzten Ressourcen. Nutzt REST über das User Datagram Protocol (UDP), um Bandbreite und Overhead im Vergleich zu TCP zu minimieren	[TIGH20]
<b>DDS</b>	Geringe Latenz, auch bei hoher Anzahl an Nachrichten	Hoher Implementierungsaufwand	[AL-M20]	[AL-M20]	Implementiert ein Busmodell und erfordert die Registrierung von Entitäten, bevor Kommunikation möglich.	[SILV21]
<b>REST</b>	Hohe Latenz	Niedriger Implementierungsaufwand	[PETR21a]	[PETR21a]	Es existieren einheitliche Schnittstellen. Eignen sich für Szenarien, in denen Einfachheit und Benutzerfreundlichkeit wichtig sind, z.B. bei Webanwendungen.	[PETR21a]
<b>HTTP</b>	Erhöhte Latenz wegen zusätzlichem Overhead	-	[AL-M20]	-	-	-
<b>XMPP</b>	Hohe Latenz	-	[AL-M20]	-	-	-
<b>AMQP</b>	Geringe Latenz	-	[AL-M20]	-	-	-



**A.10 Ergänzungen zum Anwendungsfall Printmedienindustrie**  
**Gestaltungselement 1.1: Wertstrom**

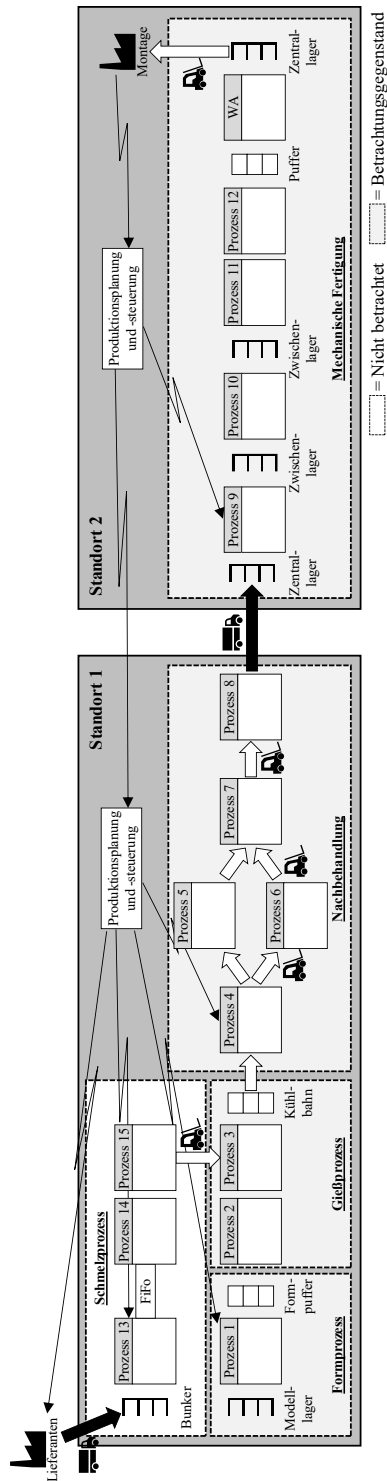


Abbildung 64: Wertstrom Printmedienindustrie

### Gestaltungselement 1.3: Datenaufnahme

Tabelle 27: Datenbedarfsmatrix Form- und Gießprozess

Datenbedarf	Formprozess			Gießprozess					
	Prozess 1		Puffer	Prozess 2		Prozess 3		Puffer	
	IT-Systeme	Multimodale Datenaufnahme		IT-Systeme	IT-Systeme	IT-Systeme	IT-Systeme	IT-Systeme	IT-Systeme
	Access-DB 1	Los-Log	Access-DB 1	Access-DB 1	Access-DB 1	Access-DB 1	Access-DB 1	Access-DB 2	
Bearbeitungszeit	o	o		x	x	x	x		
Zykluszeit	o	o		o	o	o	o		
Losgröße	x	x		x	x	x	x		
Liegezeit			x	x				x	
Durchlaufzeit	o	o		o	o	o	o		
Qualitätsdaten									

Tabelle 28: Datenbedarfsmatrix Nachbehandlung 1/2

Datenbedarf	Nachbehandlung							
	Prozess 4		Prozessverbindung 4-5/6		Prozess 5		Prozess 6	
	IT-Systeme	Multimodale Datenaufnahme	Multimodale Datenaufnahme		Multimodale Datenaufnahme		Multimodale Datenaufnahme	
	Access-DB 2	Bauteil-Log 1	Bauteil-Log 1		Bauteil-Log 1		Bauteil-Log 1	
Bearbeitungszeit	o	x	o		o	o	o	o
Zykluszeit	o	x	o		o	o	o	o
Losgröße			o		o	o	o	o
Liegezeit				o	o			
Durchlaufzeit	o		o		o	o	o	o
Qualitätsdaten								

Tabelle 29: Datenbedarfsmatrix Nachbehandlung 2/2

Datenbedarf	Nachbehandlung						
	Prozessverbindung 5/6 -7	Prozess 7		Prozessverbindung 7-8		Prozess 8	
	0	Multimodale Datenaufnahme	Multimodale Datenaufnahme	Multimodale Datenaufnahme	Multimodale Datenaufnahme	Multimodale Datenaufnahme	Multimodale Datenaufnahme
	Bauteil-Log 1	Bauteil-Log 1	Bauteil-Log 1	Bauteil-Log 1	Bauteil-Log 1	Bauteil-Log 1	Bauteil-Log 1
Bearbeitungszeit		o	o		o	o	
Zykluszeit		o	o		o	o	
Losgröße		o	o		o	o	
Liegezeit	o	o		o	o		
Durchlaufzeit		o	o		o	o	
Qualitätsdaten							

Tabelle 30: Datenbedarfsmatrix Mechanische Fertigung 1/2

Datenbedarf	Mechanische Fertigung				
	Warenlager	Prozess 9	Supermarkt 9/10	Prozess 10	Supermarkt 10/11
	Multimodale Datenaufnahme Bauteil-Log 2	Multimodale Datenaufnahme Bauteil-Log 2	Multimodale Datenaufnahme Bauteil-Log 2	Multimodale Datenaufnahme Bauteil-Log 2	Multimodale Datenaufnahme Bauteil-Log 2
Bearbeitungszeit		o o		o o	
Zykluszeit		o o		o o	
Losgröße		o o		o o	
Liegezeit	o o		o o		o o
Durchlaufzeit		o o		o o	
Qualitätsdaten					

Tabelle 31: Datenbedarfsmatrix Mechanische Fertigung 2/2

Datenbedarf	Mechanische Fertigung			
	Prozess 11	Prozess 12	Puffer 12/13	Warenausgang
	Multimodale Datenaufnahme Bauteil-Log 2	Multimodale Datenaufnahme Bauteil-Log 2	Multimodale Datenaufnahme Bauteil-Log 2	Multimodale Datenaufnahme Bauteil-Log 2
Bearbeitungszeit	o o	o o		o o
Zykluszeit	o o	o o		o o
Losgröße	o o	o o		o o
Liegezeit			o o	
Durchlaufzeit	o o	o o		o o
Qualitätsdaten		o o		

## A.11 Ergänzungen zum Anwendungsfall Lebensmittelindustrie

### Gestaltungselement 2.3: Datenverarbeitung<sup>23</sup>

Die Zykluszeit (ZZ) wird anhand der Bruttoproduktionszeit und der Produktionsmenge bestimmt, sodass mögliche Ausfälle und Unterbrechungen der Produktionslinie integriert werden. Auf diese Weise ergibt sich die Formel zur Berechnung der durchschnittlichen Zykluszeit eines Prozessschrittes zu:

$$\emptyset ZZ = \frac{\sum \text{Bruttoproduktionszeit [s]}}{\text{Produktionsmenge [Stk]} * \text{Anzahl betrachteter Maschinen}} \quad (1)$$

Der Verfügbarkeitsgrad ist als separate Spalte in den MES-Daten vorhanden. In der Verpackung sind für jeden Prozessschritt parallele Ressourcen im Einsatz. Da für die Darstellung der Verfügbarkeit diese jedoch für den Prozessschritt allgemein dargestellt werden soll, muss ein Mittelwert der Verfügbarkeiten je Prozessschritt berechnet werden. Dieser ergibt sich zu:

$$\emptyset \text{Verfügbarkeitsgrad} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Verfügbarkeit Maschine}_i}{\sum \text{produzierender Maschinen}} \quad (2)$$

Um den Leistungsgrad zu berechnen, wird die theoretische Kapazität der Linie benötigt. Diese Information ist notwendig, da nicht alle Maschinen 24 Stunden am Stück produzieren und eine Nichtberücksichtigung das Ergebnis verfälschen würde. Der Leistungsgrad ergibt sich demnach folgendermaßen:

$$\text{Leistungsgrad} = \frac{\text{aktuelle Produktionsmenge [kg]}}{\text{theo.Kapazität} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] * \text{Brutto Produktionszeit [h]}} \quad (3)$$

Der letzte Faktor zur Berechnung der OEE ist der Qualitätsfaktor. Mithilfe der folgenden Formel kann dieser bestimmt werden:

$$\text{Qualitätsgrad} = \frac{\text{Produktionsmenge} - \text{Ausschuss}}{\text{Produktionsmenge}} \quad (4)$$

Im Anschluss kann die OEE aus den drei zuvor bestimmten Faktoren berechnet werden:

$$\text{OEE} = \text{Verfügbarkeitsgrad} * \text{Leistungsgrad} * \text{Qualitätsgrad} \quad (5)$$

<sup>23</sup> Weiterführende Informationen sind in [FREI21] zu finden.

### Gestaltungselement 3.2: Schnittstelle virtuell/physisch

Tabelle 32: Anwendungsfall Lebensmittelindustrie – Anforderungen an die Softwarelösung

Kategorie	Anforderung
Funktionale Anforderungen	1. Das Tool soll einen ganzheitlichen und transparenten Überblick über den Wertstrom geben, mit dem Fokus auf dem Materialfluss und den zugehörigen Produktionsdaten. Dabei soll es auf die etablierten Wertstromsymbole zurückgreifen.
	2. Das Tool soll an die Produktionsdaten aus verschiedenen Datenquellen angebunden sein. Als Mindestanforderung wird eine Excel-Schnittstelle definiert.
	3. Das Tool soll die Daten verarbeiten und aufbereiten können, bspw. in Form eines Abweichungsmanagements.
	4. Die Hardware des Unternehmens muss die Systemanforderungen des Tools erfüllen, sodass die Funktionsfähigkeit sichergestellt ist.
Nicht-funktionale Anforderungen	5. Die Benutzer:innen-Oberfläche soll nutzer:innen-freundlich gestaltet sein.
	6. Die Implementierung des Tools soll ohne Vorwissen möglich sein.
	7. Der Aktualisierungsaufwand der Daten soll so gering wie möglich sein, sodass das Tool sich in den Arbeitsalltag integrieren lässt. Wunschlösung ist eine automatische Aktualisierung der Daten.
	8. Fehlerhafte Eingaben sollen ohne Schwierigkeiten erkannt und behoben werden können. Die Funktionsfähigkeit des Tools muss auch bei fehlerhaften Daten gegeben sein.
Organisatorische und technische Randbedingungen	9. Die Implementierungskosten, insbesondere die Anschaffungskosten, sollen so gering wie möglich ausfallen.
	10. Das Tool soll in die Softwarelandschaft des Unternehmens integrierbar sein.
	11. Das Tool soll zusätzlich im Unternehmen im Rahmen von anderen Anwendungen anwendbar sein und keine Insellösung darstellen.
	12. Das Tool soll auf weitere Anwendungsfälle übertragbar sein.

Das Ergebnis der *systematischen Gewichtung* ist in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 33: Gestaltungselement 3.2 – Systematische Gewichtung der Anforderungen (n=4) nach [FRIC21a]

Bewertungskriterium	Person				Durchschnitt (n=4)	Gewichtung
	1	2	3	4		
Visualisierung	19	19	14	13	16,25	12,31%
Datenanbindung	20	20	11	12	15,75	11,93%
Datenauswertung	20	18	15	13	16,50	12,50%
Systemanforderungen	1	1	8	12	5,50	4,17%
Nutzer:innen-Freundlichkeit	13	13	14	17	14,25	10,80%
Aktualisierungsaufwand	13	13	16	14	14,00	10,61%
Fehlerrobustheit	12	13	12	10	11,75	8,90%
Kosten	9	9	6	3	6,75	5,11%
Integration	5	5	7	11	7,00	5,30%
Erweiterbarkeit	4	4	8	10	6,50	4,92%
Praktische Anwendungen	3	5	11	7	6,50	4,92%
Qualifikation	13	12	10	10	11,25	8,52%
Summe	132	132	132	132	132	100%

Nach der Priorisierung der Anforderungen wurde die *Identifikation potenzieller Softwarelösungen* forciert. Im Rahmen einer Marktrecherche wurden sechs Softwarelösungen identifiziert, die auf ihre Eignung zur Erfüllung der Anforderungen getestet wurden: *Microsoft Visio*, *Microsoft PowerBI*, *SIMVSM*, *LucidChart*, *EdrawMax* und

*ConceptDraw Diagram*. Um die Eignung der Softwarelösungen zu bewerten, wurden quantitative Bewertungsskalen für die Anforderungen festgelegt. Zur Bestimmung der Teilnutzwerte werden zunächst die Bewertungsskalas definiert. Da ein Großteil der Anforderungen nicht zahlenmäßig bewertet werden kann, werden hierfür qualitative Skalen festgelegt. Lediglich die Kosten werden in einer Bewertungsskala quantifiziert. Hierzu wird die Bewertungsskala in fünf Abschnitte unterteilt. Die Kosten werden auf Grundlage einer Internetrecherche in Kostenbereiche unterteilt, wobei die Anschaffungskosten der Softwarelösung betrachtet werden (vgl. Tabelle 34).

Tabelle 34: Bewertungsskala – Quantitative Bewertungskriterien

Kriterium	Quantitative Teilnutzenwerte				
	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>Kosten</b>	>1000€ (oder 50€ monatlich pP.)	<1000€ (oder 50€ monatlich pP.)	<500€ (oder 25€ monatlich pP.)	<250€ (oder 10€ monatlich pP.)	keine Kosten / bereits vorhanden

Des Weiteren existieren binäre Bewertungen, in denen ein Kriterium entweder erfüllt ist oder nicht. Dementsprechend wird es mit einem Teilnutzwert 0 oder 1 belegt. Diese Bewertungsskala wird für die Kriterien Systemanforderungen, Integration und Erweiterbarkeit angewendet. Die Definition der Skalen sind in Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 35: Bewertungsskala – Binäre Bewertungskriterien

Kriterium	Binäre Teilnutzenwerte	
	0	1
<b>Systemanforderungen</b>	Min. Systemanforderungen nicht erfüllt	Min. Systemanforderungen erfüllt und benötigte Hardware vorhanden
<b>Integration</b>	Alleinstehende Software, keine Schnittstellen zu anderen Softwares im Unternehmen	Eingliederung in die bestehende Softwarelandschaft
<b>Erweiterbarkeit</b>	Nutzen auf den Zusammenhang der WSA beschränkt	Nutzung des Tools im Unternehmen über die WSA hinweg möglich

Das letzte verwendete Verfahren nutzt ein minimal zu erreichendes Ziel. Bei Erreichung dieses Zielwertes wird das Kriterium mit einem positiven Teilnutzwert belegt, der sich zwischen den Grenzen 0 und 1 befindet. Bei einer qualitativen Bewertung wird demnach bei partieller Erfüllung des Kriteriums ein Teilnutzwert von 0,5 angegeben. Entsprechend werden höhere Teilnutzwerte bei höherer Zielerreichung vergeben. Die Bewertungsskala ist in Tabelle 36 für die Anforderungen Visualisierung, Datenanbindung, Datenauswertung, Nutzer:innen-Freundlichkeit, Qualifikation, Aktualisierungsaufwand, Fehlerrobustheit und praktische Anwendungen dargestellt.

Tabelle 36: Bewertungsskala – Bewertungskriterien Minimalanforderungen

Kriterium	Teilnutzenwerte Minimalanforderungen		
	0	0,5	1
<b>Visualisierung</b>	Keine Visualisierung möglich	Visualisierung der Daten	Visualisierung der Daten + Wertstromsymbolik
<b>Datenanbindung</b>	Dateneingabe nur manuell möglich	Mindestanforderung Excel-Schnittstelle	Integration von Daten aus mehreren Quellen möglich
<b>Datenauswertung</b>	Daten werden nur präsentiert, ohne diese auszuwerten	Auswertung in Form von Diagrammen, Charts, Abweichungen	Weiterführende Auswertungen wie Simulationen oder Szenarioanalysen möglich
<b>Nutzer:innen-Freundlichkeit</b>	Nutzung des Tools ist kompliziert und erfordert Vorkenntnisse	Anwendung des Tools ist grundlegend nutzer:innenfreundlich, einige Funktionen sind jedoch unzugänglich	Präsentation und Nutzung des Tools ist durchgehend intuitiv und nutzer:innenfreundlich
<b>Qualifikation</b>	Entwicklung mit dem Tool erfordert Vorwissen	Entwicklung grundlegend ohne Vorwissen möglich, Schulung für vollständiges Verständnis notwendig	einfache Anwendung möglich ohne Vorwissen zu besitzen
<b>Aktualisierungsaufwand</b>	hoher zeitlicher Aufwand, manuelle Arbeitsschritte	teilautomatisierte Aktualisierung	vollautomatisierte Aktualisierung der Daten
<b>Fehlerrobustheit</b>	Fehler werden nicht erkannt	Fehler werden erkannt und markiert	Hilfe bei der Fehlersuche und Lösungsvorschläge
<b>Praktische Anwendungen</b>	Tool verfügt über keine praktischen Anwendungen in der Literatur	vereinzelte Anwendungen in einem anderen Kontext	Anwendung im Rahmen der WSA und / oder der Prozessindustrie

Das Ergebnis der Bewertung und die *Selektion der am besten geeigneten Softwarelösung* ist in Tabelle 37 dargestellt. Die Bewertung wurde hierbei im Projektteam vorgenommen.

Tabelle 37: Gestaltungselement 3.2 – Selektion der Softwarelösung

Bewertungskriterium	Softwarelösung					
	Microsoft Visio	Microsoft PowerBI	SIMVSM	Lucid-Chart	Edraw-Max	Concept-Draw Diagram
<b>Visualisierung</b>	1	0,5	1	1	1	1
<b>Datenanbindung</b>	1	1	0	0	0	0,5
<b>Datenauswertung</b>	0,5	1	0,5	0	0	0,5
<b>Systemanforderungen</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Nutzer:innen-Freundlichkeit</b>	1	0,5	1	1	1	1
<b>Aktualisierungsaufwand</b>	1	0,5	0	0	0	0
<b>Fehlerrobustheit</b>	0,5	0,5	0,5	0	0	0
<b>Kosten</b>	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>Integration</b>	1	1	0	0	0	0
<b>Erweiterbarkeit</b>	1	1	0	1	1	1
<b>Praktische Anwendungen</b>	0,5	0	1	0	0	0
<b>Qualifikation</b>	1	0	1	1	1	1
<b>Durchschnitt</b>	<b>0,875</b>	<b>0,667</b>	<b>0,563</b>	<b>0,479</b>	<b>0,479</b>	<b>0,646</b>

## A.12 Ergänzungen zum Anwendungsfall standardisierte Laborumgebung

### Methodenschritt 1.1: Definition Wertstrom

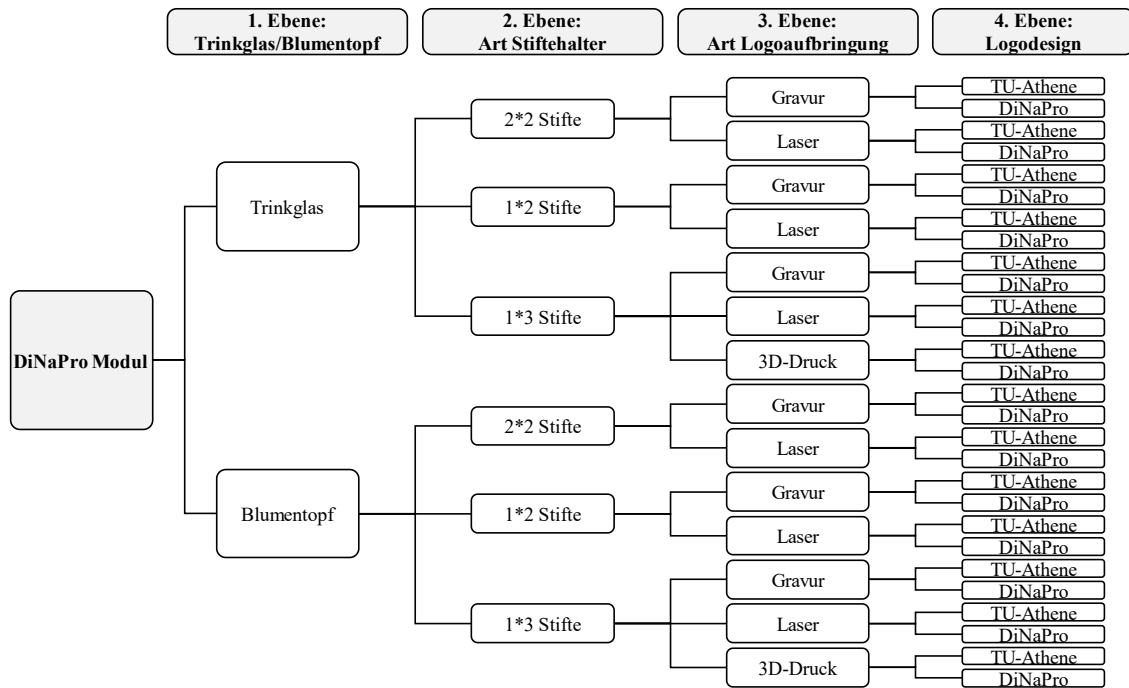


Abbildung 65: Methodenschritt 1.1 – Auswahl Produktfamilie



## Methodenschritt 1.3 und 1.4: Datenbedarfsmatrix Standort 1

Tabelle 38: Datenbedarf standardisierte Laborumgebung – Standort 1, 1/3

Datenbedarf	Fräsen 1 Multimodale Datenaufnahme			Fräsen 2 Multimodale Datenaufnahme		
	Traceability-System	IoT-Plattform	Kalkulation	Traceability-System	IoT-Plattform	Kalkulation
Ausschussrate	o		o	o		o
Ausschussgrund	o	o		o	o	
Bearbeitungszeit	o	o		o	o	
Zykluszeit	o	o		o	o	
Losgröße	o	o		o	o	
Liegezeit						
Durchlaufzeit	o		o	o		o
Bestände						
Engpass	o	o		o	o	

Tabelle 39: Datenbedarf standardisierte Laborumgebung – Standort 1, 2/3

Datenbedarf	Prozessverbindung Fräsen 1 - Reinigen Multimodale Datenaufnahme			Prozessverbindung Fräsen 2 - Reinigen Multimodale Datenaufnahme		
	Traceability-System	IoT-Plattform	Kalkulation	Traceability-System	IoT-Plattform	Kalkulation
Ausschussrate	o		o	o		o
Ausschussgrund	o	o		o	o	
Bearbeitungszeit	o	o		o	o	
Zykluszeit	o	o		o	o	
Losgröße	o	o		o	o	
Liegezeit						
Durchlaufzeit	o		o	o		o
Bestände						
Engpass	o	o		o	o	

Tabelle 40: Datenbedarf standardisierte Laborumgebung – Standort 1, 3/3

Datenbedarf	Reinigung Multimodale Datenaufnahme			Prozessverbindung Reinigung Montage Multimodale Datenaufnahme			Montage Multimodale Datenaufnahme		
	Traceability-System	IoT-Plattform	Kalkulation	Traceability-System	IoT-Plattform	Kalkulation	Traceability-System	IoT-Plattform	Kalkulation
Ausschussrate	o		o				o		o
Ausschussgrund	o	o					o	o	
Bearbeitungszeit	o	o					o	o	
Zykluszeit	o	o					o	o	
Losgröße	o	o					o	o	
Liegezeit				o	o				
Durchlaufzeit	o		o	o		o	o		o
Bestände				o	o				
Engpass	o	o					o	o	



### Methodenschritt 3.3: Selektion der Softwarelösung

Tabelle 43: Quantitative Bewertungskriterien nach Teilnutzenwerten

Kriterium	Teilnutzenwerte binär					
	0		1			
<b>Adaptierbarkeit</b>	Softwarelösung ist nicht erweiterbar		Softwarelösung ist erweiterbar um Anwendungsfälle, wie bspw. CO <sub>2</sub> -Bilanzierung			
<b>Teilnutzenwerte 3-stufig</b>						
	0		0,5		1	
<b>Dynamik</b>	Keine Dynamik, statisches Tool		Echtzeitnahe Datenanbindung		Live-Datenanbindung	
<b>Symbolik</b>	WSM-Symbolik wird nicht verwendet		WSM-Symbolik wird verwendet, ohne Zeitachse		WSM-Symbolik wird verwendet, mit Zeitachse	
<b>Darstellung</b>	Keine Darstellung des Material- und Informationsflusses		Material- und Informationsfluss nur getrennt darstellbar und nicht nach Prozess		Material- und Informationsfluss werden über relevante Prozesse dargestellt	
<b>Simulation</b>	Keine Simulation möglich		Daten können aus Simulation übernommen werden; Daten könne an Simulation weitergegeben werden		Lösung besitzt integrierte Simulationssoftware	
<b>Teilnutzenwerte 4-stufig</b>						
	0		0,33	0,67	1	
<b>Datenaufnahme</b>	Keine Datenaufnahme möglich		Einmalige Datenaufnahme ("Import")	Regelbasierter, automatisierter Datenabgriff	Live-Datenanbindung	
<b>Aktualisierung</b>	Keine Datenaktualisierung möglich		Aktualisierung durch Neuladen der Daten	Aktualisierung durch Nutzer:innen („Knopfdruck“)	Automatisierte, regelbasierte Aktualisierung	
<b>Teilnutzenwerte 5-stufig</b>						
	0		0,25	0,5	0,75	1
<b>Zeitaufwand</b>	WSM mit Stift und Papier auf dem Shopfloor (klassische Methode)		WSM mit Tablet, Aufnahme auf dem Shopfloor	WSM "halbautomatisch", Prozesskasten werden automatisch erstellt, Verknüpfung muss selbst erstellt werden	WSM "halbautomatisch", Prozesskasten mit Dateneinträgen werden automatisch erstellt, Verknüpfung muss selbst erstellt werden	Vollautomatisierte Erstellung des Wertstromabildes
<b>Kosten</b>	>300€		201-300€	101-200€	1-100€	keine Kosten; Forschungs-Lizenz
<b>Datenabgriff</b>	keine Möglichkeit		Excel oder CSV-Dateien anbindbar	Excel und CSV	Datenbanken können angebunden werden (z.B SQL)	Gängige IT-Systeme der Produktion können angebunden werden
<b>Bottleneck-Finder</b>	keine Anzeigemöglichkeit		Bottlenecks könne per Hand markiert werden	kritischer Pfad kann angezeigt werden	kritischer Pfad wird automatisch angezeigt mit Bottleneck-Prozess	kritischer Pfad wird automatisch angezeigt mit Bottleneck-Prozess und Änderungshinweis
<b>Kennzahlen</b>	keine KPIs werden angezeigt		KPIs eintragbar über Notizen in jedem Prozess	KPIs eintragbar über Formeln in jedem Prozess	KPIs eintragbar über Formel, wird für jeden Prozess automatisch berechnet	KPIs werden automatisch berechnet, z.B. über Dropdown auswählbar

### A.13 Strukturierter Fragebogen zur Evaluation

Tabelle 44: Fragebogen zur Evaluation der Anforderungen

Anforderung	Auswahlmöglichkeiten				
	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Neutral	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu
<b>Inhaltliche Anforderungen an das Gestaltungsmodell</b>					
(I-1) Das Gestaltungsmodell ermöglicht ein aufwandsarmes Monitoring zentraler Wertstromkennzahlen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(I-2) Das Gestaltungsmodell ermöglicht die Identifikation des Engpasses und der Bestände.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(I-3) Das Gestaltungsmodell berücksichtigt die Dynamik des Wertstroms bei der Dimensionierung der Wertstromkapazitäten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(I-4) Das Gestaltungsmodell reduziert den Aufwand für die regelmäßige Datenakquise und -aktualisierung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(I-5) Das Gestaltungsmodell ermöglicht die Identifikation von Wechselwirkungen einzelner Prozessschritte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(I-6) Das Gestaltungsmodell ermöglicht das Erkennen von Veränderungen und Trends in der Wertstromleistung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Formale Anforderungen an das Gestaltungsmodell</b>					
(F-G-1) Das Gestaltungsmodell modelliert nur Sachverhalte, die für den zugrundeliegenden Modellierungszweck relevant sind.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(F-G-2) Das Gestaltungsmodell ist leicht verständlich und überzeugt durch leichte Lesbarkeit, Anschaulichkeit und Verständlichkeit.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(F-G-3) Im Gestaltungsmodell werden alle für die Stakeholder relevanten Informationen abgebildet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(F-G-4) Das Gestaltungsmodell ist mit geringem Aufwand nachträglich anpassbar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(F-G-5) Das Gestaltungsmodell ist technisch, zeitlich und kostenmäßig implementierbar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Formale Anforderungen an die Methode</b>					
(F-M-1) Die Methode ist unabhängig von subjektiven Einflüssen der durchführenden Personen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(F-M-2) Die Methode führt unter gleichen Bedingungen wiederholt zum gleichen Ergebnis.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(F-M-3) Die Methode ist anpassbar, sofern neue Informationen oder Parameter eine Erweiterung oder Änderung erfordern.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(F-M-4) Die Methode ist in verschiedenen Produktionsumgebungen sowie in unterschiedlichen Branchen anwendbar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(F-M-5) Die Methode ist praktikabel und einfach anwendbar. Die unerfahrenen Anwendenden werden durch einen klaren Lösungsweg zum Ziel geleitet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Allgemeine Angaben</b>					
(A-1) In welcher Branche sind Sie aktuell tätig?					
(A-2) Wie viele Mitarbeitende arbeiten in Ihrem Unternehmen?	<9	10-49	50-249	250-499	>499
(A-3) In welcher Rolle sind Sie im Unternehmen tätig?					

## A.14 Betreute Abschlussarbeiten

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden durch den Autor die nachfolgenden Abschlussarbeiten von Studierenden betreut, welche detaillierte Informationen und Vorarbeiten zu dieser Arbeit enthalten.

Tabelle 45: Übersicht betreuter Arbeiten mit weiterführenden Informationen

Nr.	Studierende	Jahr	Typ	Titel
1	Janßen, Simon	2019	SA	Weiterentwicklung der statischen Wertstrommethode zu einem dynamischen Echtzeitwertstrom – Eine Literaturanalyse
2	Schuck, Laura	2021	MT	Aufbau eines Priorisierungssystems für Verbesserungsprojekte im Rahmen des Wertstrommanagements
3	Reintke, Maximilian	2021	MT	Ermittlung charakteristischer Aufgaben und Eigenschaften eines Wertstrommanagers
4	Schneider, Timo	2021	MT	Entwicklung eines Demonstrators für ein digitales Wertstromabbild mithilfe einer Lokalisierungstechnologie am Beispiel der Prozesslernfabrik CiP
5	De Vasconcellos, Artur	2021	SA	Konzeption und Aufbau eines parametrischen Wertstrommodells am Beispiel der Prozesslernfabrik CiP
6	Freitag, Norman	2021	MT	Implementierung eines digitalen Wertstromabbildes für die Prozessindustrie am Beispiel der Ferrero OHG GmbH
7	Schwing, Maximilian	2021	MT	Ermittlung charakteristischer Wertstromkennzahlen für unterschiedliche Fertigungstypen
8	Gabele, Sebastian	2021	MT	Modellierung eines digitalen Wertstromabbildes am Beispiel des Wertstroms der Prozesslernfabrik CiP
9	Jäckel, Matthis	2021	BT	Der digitale Zwilling in nachhaltigen Produktionssystemen - eine systematische Literaturanalyse
10	Lemanczyk, Phillip	2021	MT	Entwicklung einer Methodik zur Anforderungsidentifikation an digitale Zwillinge im Kontext von Geschäftsmodellen in der Kreislaufwirtschaft
11	Jung, Julius	2022	MT	Entwicklung eines mathematischen Optimierungsmodells zur nachfrageorientierten und kostenoptimalen Wertstromgestaltung am Beispiel der Robert Bosch GmbH
12	Gutiérrez Tenorino, David	2022	MT	Entwicklung eines mathematischen Optimierungsmodells zur Wertstromgestaltung auf Basis unterschiedlicher Zielgrößen der Produktion
13	Terwolbeck, Jan	2022	MT	Entwicklung und Durchführung einer Expertenbefragung zur systematischen Anforderungsdefinition an einen Digitalen Wertstromzwilling
14	Klipfel, Sven	2023	MT	Entwicklung einer Methodik zur Erstellung eines wertstromspezifischen Datenmodells zur Realisierung eines digitalen Prozesszwillings
15	Seibel, Benjamin	2023	MT	Einführung und Weiterentwicklung eines Gestaltungsmodells für den Digitalen Wertstromzwilling am Beispiel der Prozesslernfabrik CiP
16	Goodman, Timothy	2024	BT	Konzeption und Entwicklung einer Methode zur Implementierung eines Digitalen Wertstromschattens
17	Maliqi, Valdrin	2024	MT	Entwicklung eines Digitalen Wertstromschattens in den Dimensionen Ressourceneffizienz, Zeit und Qualität am Beispiel der Heidelberger Druckmaschinen AG
18	Neumann, Fabienne	2024	MT	Konzeption und Entwicklung eines digitalen Wertstromabbildes eines Wertstroms in den PTW-Lernfabriken

BT: Bachelorthesis; MT: Masterthesis; SA: Studienarbeit

## A.15 Publikationsübersicht

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden die nachfolgend aufgelisteten wissenschaftlichen Publikationen erstellt, welche detaillierte Informationen und Vorarbeiten zu dieser Arbeit enthalten. Um die Wissenschaftlichkeit sicherzustellen, durchliefen alle Veröffentlichungen vor ihrer Publikation einen Peer-Review-Prozess durch unabhängige Expert:innen.

Tabelle 46: Übersicht Publikationen mit Vorarbeiten zu dieser Arbeit

Quelle	Jahr	Typ	Titel
[FRIC20]	2020	FB	Echtzeitdaten für das Wertstrommanagement: Entwicklung eines digitalen Schattens der Produktion zur Darstellung des Wertstroms in Echtzeit
[FRIC22a]	2022	JO	The Digital Value Stream Twin
[FRIC23]	2023	FB	Wertstrommanagement im Zeitalter dynamischer Produktionssysteme: Aufgaben und Herausforderungen – Ein Blick aus der Praxis
[FRIC24d]	2024	KO	Implementing a Digital Twin of a Value Stream
[FRIC24f]	2024	JO	Design Model for the Digital Shadow of a Value Stream

FB: themenbezogener Fachbeitrag; JO: Journal-Beitrag; KO: Konferenz-Beitrag

Weiterhin wurden im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit die folgenden Forschungsdaten in Übereinstimmung mit den „Leitlinien zum Umgang mit digitalen Forschungsdaten an der TU Darmstadt“ erhoben. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Forschungsdaten zu jederzeit öffentlich zugänglich sind.

Tabelle 47: Übersicht der Forschungsdaten zu dieser Arbeit

Quelle	Jahr	Titel
[FRIC21a]	2021	Anwendungsfall Lebensmittelindustrie - Gewichtung der Softwareanforderungen
[FRIC21b]	2021	Expert:innen-Interviews Aufgaben im Wertstrommanagement
[FRIC22b]	2022	Ermittlung der Gestaltungselemente eines Digitalen Wertstromzwillings
[FRIC24a]	2024	Evaluation der Anforderungen an einen Digitalen Wertstromzwilling
[FRIC24e]	2024	Gewichtung Softwareanforderungen Anwendung standardisierte Laborumgebung
[FRIC24b]	2024	Anwendung standardisierte Laborumgebung - Rohdaten der Produktionswochen
[FRIC24c]	2024	Dashboard zur bauteilindividuellen CO2-Bilanzierung auf Basis von Wertstromdaten