

FAU Studien aus dem Maschinenbau 439

Andreas Selmaier

DMAICS-Zyklus zur Digitalisierung in produzierenden Unternehmen

Andreas Selmaier

DMAICS-Zyklus zur Digitalisierung in produzierenden Unternehmen

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 439

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Andreas Selmaier

DMAICS-Zyklus zur Digitalisierung in produzierenden Unternehmen

**Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS) Prof. Dr. -Ing. Jörg Franke**

Erlangen
FAU University Press
2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Kontakt: Andreas Selmaier, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ([ROR https://ror.org/oof7hpc57](https://ror.org/oof7hpc57)), <https://orcid.org/0000-0002-1008-0716>

Bitte zitieren als

Selmaier, Andreas. 2024. *DMAICS-Zyklus zur Digitalisierung in produzierenden Unternehmen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 439. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-734-0.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: <https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-733-3 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-734-0 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-734-0

**DMAICS-Zyklus zur Digitalisierung
in produzierenden Unternehmen**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Andreas Selmaier, M.Sc.

aus Landshut

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 13.12.2023

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr. Verena Tiefenbeck

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, Leiter dieses Lehrstuhls, für das in mich gesetzte Vertrauen und die Möglichkeit zur Promotion. Die stetige Unterstützung meiner Forschungstätigkeiten sowie die zahlreichen wertvollen Diskussionen haben meine wissenschaftliche Arbeit entscheidend geprägt und zu meiner fachlichen und persönlichen Entwicklung beigetragen. Des Weiteren geht mein Dank an Prof. Dr.-Ing. Silvia Budday für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsverfahrens, an Prof. Dr. Verena Tiefenbeck für die Übernahme des Korreferats sowie an Prof. Dr. Marc Berges als weiteres Mitglied des Prüfungsausschusses.

Ein großer Dank gilt zudem allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl FAPS sowie der Technik und Verwaltung für den gelebten Teamgeist und die ausgezeichnete Arbeitsatmosphäre. Insbesondere bedanke ich mich bei den Forschungsbereichen Engineering-Systeme und Automatisierungstechnik für den fachlichen Austausch sowie die gemeinsamen Aktivitäten auch außerhalb der Arbeitszeit. Ferner gilt mein Dank allen engagierten Studierenden, die mich bei meiner Forschungstätigkeit unterstützt haben.

Weiterhin bedanke ich mich bei den Kolleginnen und Kollegen meines Industriepartners der Siemens Healthineers AG, insbesondere Herrn Dr. Jens Fürst, für das entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit zur praxisnahen Realisierung des Forschungsvorhabens.

Hervorheben möchte ich die Kollegen Dominik Kisskalt, Martin Sjarov und meinen Forschungsbereichsleiter Matthias Brossog für die fortwährende Unterstützung und die intensiven Diskussionen, die immens zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die nicht nur meinen Bildungsweg ermöglicht, sondern diesen auch unterstützt und begleitet haben. Mein größter Dank gilt meiner Partnerin Katrin, die mir immer Rückhalt und die Motivation für die Anfertigung dieser Dissertation gab.

Erlangen, im Dezember 2023

Andreas Selmaier

„Losers have goals. Winners have systems.“ - Scott Adams

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvi
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Digitalisierung im Kontext der Produktion.....	3
2.1.1 Klärung von Begriffen.....	4
2.1.2 Lebenszyklusbetrachtung digitaler Lösungen.....	8
2.1.3 Konzeptionelle Verbindung der schlanken Produktion und Industrie 4.0.....	10
2.1.4 Konvergenz von Informations- und Betriebstechnik.....	13
2.1.5 Kultureller Wandel im Kontext der Digitalisierung.....	16
2.1.6 Eruiierung des Komplexitätsbegriffs.....	23
2.2 Produktionssystematische Grundlagen.....	25
2.2.1 Stakeholder.....	25
2.2.2 Unternehmensziele.....	28
2.2.3 Unternehmensstrategie.....	31
2.2.4 Aufbau- und Ablauforganisation.....	33
2.2.5 Fabrikplanung und -betrieb.....	37
2.2.6 Projektmanagement.....	39
2.3 Kritische Würdigung des Stands der Forschung und Handlungsbedarf.....	43
2.3.1 Definition des Objekt-, Prädikat- und Zielbereichs zur Bewertung bestehender Ansätze.....	44
2.3.2 Darstellung bestehender Ansätze.....	50
2.3.3 Bewertung bestehender Ansätze.....	55
2.3.4 Handlungsbedarf.....	57
3 Konzeption der DMAICS-Methodik	61
3.1 Methodische und modelltheoretische Grundlagen.....	63
3.2 Formale Anforderungen an die Methodik.....	65
4 Detaillierung der DMAICS-Methodik	67
4.1 Define-Phase.....	67
4.1.1 Generierung von Innovationsideen und Bedarfsermittlung der Digitalisierung im Produktionsbereich.....	68
4.1.2 Begutachtung und Anreicherung von Digitalisierungsideen durch Mehrpersonenbefragungen.....	75

4.1.3	Priorisierung von Digitalisierungsideen.....	79
4.1.4	Zwischenfazit zur Define-Phase.....	83
4.2	Measure-Phase	84
4.2.1	Strategische Umsetzungsplanung von Digitalisierungsmaßnahmen	86
4.2.2	Methode zur Nutzenprognose von Digitalisierungsmaßnahmen	88
4.2.3	Zwischenfazit zur Measure-Phase	90
4.3	Analyse-Phase	91
4.3.1	Methode zur interdisziplinären Entwicklung von Lösungskonzepten für die Digitalisierung im Produktionsbereich	93
4.3.2	Methode zur Projektplanung von Digitalisierungsprojekten	100
4.3.3	Vorbereitung von Digitalisierungsprojekten	105
4.3.4	Zwischenfazit zur Analyse-Phase	111
4.4	Implement-Phase	112
4.4.1	Projektübergreifende Gesamtsteuerung	113
4.4.2	Durchführung von Digitalisierungsprojekten	115
4.4.3	Projektabschluss	123
4.4.4	Zwischenfazit der Implement-Phase	125
4.5	Control-Phase.....	126
4.5.1	Ermittlung des Beitrags zur Zielerreichung von Digitalisierungslösungen	127
4.5.2	Informationssystem zur ganzheitlichen Erfassung der Kausalketten der Digitalisierung	130
4.5.3	Zwischenfazit zur Control-Phase.....	133
5	Validierung.....	135
5.1	Szenario 1: Retrofitting von Bestandsanlagen	136
5.2	Szenario 2: Anlagenexterne IoT-Sensorik	138
5.3	Szenario 3: Asynchroner Einsatz einer KI-Lösung	140
5.4	Szenario 4: Prozessbegleitender Einsatz eines KI-Modells	142
5.5	Szenario 5: Plattformbasierte Entwicklung.....	145
5.6	Szenario 6: Digitales Echtzeitabbild	147
5.7	Evaluierung formaler Anforderungen.....	150
6	Zusammenfassung und Ausblick	153
7	Summary and Outlook	157
	Literaturverzeichnis	161

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Abkürzung</i>	<i>Bezeichnung</i>
AG	Auftragsgeber
AN	Auftragsnehmer
BIM	Building Information Model
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
BoM	Bill of Material
BoP	Bill of Process
BPMN	Business Process Model and Notation
ConWIP	Constant Work in Process
DF	Digitale Fabrik
DHR	Device History Record
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung für die Verarbeitung personenbezogener Daten
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
ERP	Enterprise-Ressource-Planning
F&E	Forschung und Entwicklung
FD	Forschungsdefizit
FMC	Fundamental Modeling Concepts
FZK	Fortschrittszahlenkonzept
HMI	Human Machine Interface
I4.0	Industrie 4.0
IaaS	Infrastructure as a Service
IoT	Internet of Things
IP	Intellectual Property
IPC	Industrie-PC
IT	Information Technology
JIS	Just in Sequence
JIT	Just in Time
KCI	Key Control Indicator

<i>Abkürzung</i>	<i>Bezeichnung</i>
KPI	Key Performance Indicator
MES	Manufacturing Execution System
MRP I	Material Requirements Planning
MRP II	Manufacturing Resource Planning
MTV	Model Template View
MVP	Minimal Viable Product
OKR	Objectives and Key Results
ORM	Object Relational Mapper
OT	Operational Technology
Paas	Plattform as a Service
PLM	Production Lifecycle Management
PM	Problemmerkmal
PMBOK	Project Management Body of Knowledge
PoC	Proof of Concept
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodells für Industrie 4.0
SaaS	Software as a Service
SCM	Supply Chain Management
SHAP	Shapley Additive Explanations
TF	Teilforschungsfrage
TPM	Total Productive Maintenance
TPS	Toyota-Produktionssystem
UML	Unified Modeling Language
BIM	Building Information Model
VM	Visuelles Management

Bildverzeichnis

Bild 1:	Aufbau der vorliegenden Dissertationsschrift	2
Bild 2:	Bedeutungsinhalte des Begriffs Digitalisierung und ihre Zusammenhänge [1, 5–11].....	4
Bild 3:	Einordnung des Begriffs Digitale Fabrik sowie des Fokus dieser Arbeit in die zentralen Wertschöpfungsketten produzierender Unternehmen i.A.a. [13]	6
Bild 4:	Softwarelebenszyklus i.A.a. [20] sowie Einordnung zugehöriger Unteraktivitäten	8
Bild 5:	Konzeptionelle Verbindung von Industrie 4.0 Technologien und Lean Methoden i.A.a. [1, 38]	12
Bild 6:	Gegenüberstellung von Information Technology (IT) und Operational Technology (OT) [54, 53, 55, 56]	14
Bild 7:	Typologien von Unternehmenskulturen nach Cameron und Freeman [65] sowie Hervorhebung innovationsfreundlicher Merkmale nach Ernst [64]	17
Bild 8:	Formen der Expertenbefragung [71].....	20
Bild 9:	Stakeholder eines Unternehmens i.A.a. die Begriffsdefinition nach [93]	26
Bild 10:	Kaskadenförmiger Aufbau einer Zielhierarchie in Unternehmen i.A.a. [108].....	29
Bild 11:	Hoshin-Kanri Matrix i.A.a. [109]	30
Bild 12:	Sonderformen mehrdimensionaler Mehrliniensysteme	33
Bild 13:	Befähigung und Förderung von Digitalisierungscommunities im Rahmen der Aufbauorganisation von produzierenden Unternehmen i.A.a. [126]	35
Bild 14:	Exemplarische Prozessstruktur eines produzierenden Unternehmens [129].....	35
Bild 15:	Planungs- und Steuerungslogik der MRP II-Methode i.A.a. [140]	38
Bild 16:	Einsatzbereich von Steuerungsverfahren [141]	39

Bild 17:	Varianten organisatorischer Projektkonstellationen i.A.a. [150]	42
Bild 18:	Vorgehen bei der inhaltlichen Bewertung des Stands der Forschung.....	43
Bild 19:	Übersicht der Kriterien zur Bewertung bestehender Ansätze i.A.a. [151].....	44
Bild 20:	Systematisierung des Objektbereichs (Analysefokus) dieser Arbeit.....	46
Bild 21:	Darstellung relevanter Forschungsfelder des Prädikatbereichs sowie Verortung in Unternehmens- und Technologieebene i.A.a. [151].....	47
Bild 22:	Darstellung positiver und negativer Einflussfaktoren auf den Zielbereich der "effizienten und effektiven Digitalisierung"	49
Bild 23:	Thesen dieser Arbeit und zugrundeliegende Problemmerkmale sowie forschungsseitiger Handlungsbedarf	57
Bild 24:	Konzeptionierung des übergeordneten Vorgehensmodells der DMAICS-Methodik sowie Verortung der Teilforschungsfragen i.A.a. [163]	61
Bild 25:	Methodikmodell i.A.a. Jenke [165]	63
Bild 26:	Terminologie bei der Modellierung verschiedener Abstraktionsebenen der Methodik unter Verwendung der BPMN-Modellierungssprache (Business Process Model and Notation).....	64
Bild 27:	Vorgehen und Inhalt der Define-Phase	68
Bild 28:	Prozessmodell der Ideengenerierung in Unternehmen zur Einordnung der Kapitelinhalte.....	69
Bild 29:	Systematisierung von Methoden- und Werkzeugtypen zur Entwicklung von Digitalisierungsideen nach Wirkrichtung und treibender Kraft	70
Bild 30:	Systemische Aufschlüsselung der Zustände des Ideengenerierungsprozesses mittels des Ideenmodells von Fischer [189]	72

Bild 31:	Steckbrief zur standardisierten Erfassung von Digitalisierungsideen	74
Bild 32:	Prozessmodell zum effizienten Mehrpersonenreview von Ideen mit Einordnung der Kapitelinhalte.....	75
Bild 33:	Systemarchitekturen zum Clustering von Ideen: Manuelles System (a), System mit Softwareunterstützung mittels interaktiven Tabellen (b), System mit Softwareunterstützung mittels Clustering-Algorithmus (c) ..	76
Bild 34:	Automatisierte Generierung von Ideencluster-Vorschlägen mittels des CLICKS-Algorithmus i.A.a. [193].....	77
Bild 35:	Methode zur Priorisierung von Digitalisierungsideen	80
Bild 36:	Heuristiken zur Bewertung von Ideen [199–201]	81
Bild 37:	Zielmodell zur Bewertung und Priorisierung von Digitalisierungsideen	82
Bild 38:	Vorgehen und Inhalt der Measure-Phase	85
Bild 39:	Ableitung einer Digitalisierungsroadmap auf Basis der strategischen Zielplanung	87
Bild 40:	Prozessmodell Darstellung der Methode zur Nutzenprognose von Digitalisierungsideen	88
Bild 41:	Erstellung der Nutzennetzwerkstruktur als Bindeglied zwischen digitaler Lösung und Unternehmenszielen i.A.a. [202].....	89
Bild 42:	Systematisierung von Methoden zur Ist-Zustandsermittlung i.A.a. [204] sowie Soll-Zustandsprognose i.A.a. [203].....	90
Bild 43:	Vorgehen und Inhalte der Analyse-Phase	92
Bild 44:	Einordnung der Methode in den Prozess der Initialisierung von Digitalisierungsaktivitäten	93
Bild 45:	Angepasstes 4+1 Sichtenmodell zur Konzeptentwicklung von Digitalisierungslösungen im Produktionsbereich i.A.a. Kruchten [205].....	94
Bild 46:	Prozessmodell zur Entwicklung der Gesamtlösungskonzepte aller Sichten des 4+1 Sichtenmodells	95

Bild 47:	Methode der ganzheitlichen Projektplanung für die Umsetzung nachhaltiger Digitalisierungslösungen	100
Bild 48:	Modell zur ganzheitlichen Projektstrukturierung	101
Bild 49:	Methode zur systematischen Make-or-Buy-Entscheidung; Vorgehen nach [221].....	104
Bild 50:	Buy-Make-Matrix zur strategischen Bewertung von (Teil-)Projekten i.A.a. [208] (a) sowie Argumente für und gegen die Bildung von Kooperationsprojekten (b)	104
Bild 51:	Gantt-Diagramme zum Vergleich einer klassischen sowie einer agilen Auftraggeber-Auftragnehmer-Beziehung.....	106
Bild 52:	Eignungsmatrix zur Festlegung des AG-AN-Beziehungstyps in Abhängigkeit von der angestrebten Projektkonstellation	107
Bild 53:	Zuordnung der Informationselemente methodisch entwickelter Konzepte (vgl. Kapitel 4.3.1) gemäß der Gliederungsstruktur der Systems Requirements Specification nach IEEE 29148 [222].....	109
Bild 54:	Kollaborationsdiagramm – Vom Lastenheft zum Projektauftrag	110
Bild 55:	Vorgehen und Inhalt der Implement-Phase	112
Bild 56:	Chancen der projektübergreifenden Steuerung von Digitalisierungsaktivitäten	113
Bild 57:	Kollaborationsdiagramm bei der Projektdurchführung zur Einordnung der Kapitelinhalte.....	116
Bild 58:	Kommunikationsstrukturen von Gruppen sowie qualitative Implikationen i.A.a. [223].....	116
Bild 59:	Team-Topologien und Interaktions-Moden [224]	117
Bild 60:	Gegenüberstellung der einmaligen sowie der inkrementellen Lieferung von Projektergebnissen	118
Bild 61:	Systematisierung von Softwareentwicklungsmodellen und -methoden nach der Aufgaben- bzw. Problemtypisierung nach Dörner sowie Stacey i.A.a. [P3].....	119
Bild 62:	DevOps-Modell zur Veranschaulichung der Verzahnung von Entwicklung und Betrieb sowie Einordnung	

	prozessunterstützender kontinuierlicher Integrations- und Deployment-Pipelines (CI/CD) i.A.a. [29, 228].....	121
Bild 63:	Systematisierung von Softwarewerkzeugen eines DevOps-Toolstacks; Marktanteile IDEs/ODEs [229, 230]	122
Bild 64:	Übersicht und Inhalte der Control-Phase.....	126
Bild 65:	Systematisierung von Digitalisierungslösungen nach Strategieebene und Häufigkeit der Anwendung	127
Bild 66:	Systematische Aufschlüsselung der Elemente zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung von Digitalisierungslösungen	128
Bild 67:	Bildschirmaufnahmen des webbasiertes Informationssystems „GoDigital“; Darstellung verschiedener Ansichten am Beispiel der Define-Phase: a) Vorgehensmodellansicht, b) Prozessmodellansicht, c) Dashboard-Ansicht, d) Eingabeansicht	132
Bild 68:	Umgesetztes Konzept zum Retrofitting eines Öl-Füllstandes zum Inline-Monitoring des Partikelgehalts	137
Bild 69:	Umgesetztes Konzept einer anlagenexternen IoT-Sensorik zur fertigungsbegleitenden Schwingungsanalyse.....	139
Bild 70:	Lösungskonzept für den exemplarischen Ex-situ-Einsatz von KI-Modellen, i.A.a. [P4]	141
Bild 71:	Systemarchitektur des prozessbegleitenden Einsatzes einer KI-Lösung zur Testzeitreduktion sowie graphische Darstellung des umgesetzten Algorithmus	143
Bild 72:	Konzept einer cloudbasierten KI-Anwendung auf Basis der MLOPS-Methodik sowie graphische Veranschaulichung der Umsetzungsergebnisse	146
Bild 73:	Entwickeltes Lösungskonzept sowie graphische Illustration der Umsetzungsergebnisse [P6]	148

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich etablierter Vorgehensmodelle des Projektmanagements [146–149]	40
Tabelle 2:	Kriterienbasierte Bewertung bestehender Ansätze im Forschungsfeld	56
Tabelle 3:	Überblick relevanter Methoden und Hilfsmittel zur Erfassung von Digitalisierungspotentialen aus der Literatur	71
Tabelle 4:	Anforderungen nachgelagerter Prozesse an die Erfassung von Digitalisierungsideen	71
Tabelle 5:	Checkliste zur Einbindung potenzieller Reviewer von Digitalisierungsideen	77
Tabelle 6:	Checkliste von K.o.-Kriterien zur Bewertung von Digitalisierungsideen	81
Tabelle 7:	Mögliche Anpassungsmaßnahmen und deren Risiken	84
Tabelle 8:	Inhaltliche Detaillierung mittels operativer und strategischer Methoden sowie relevanter Artefakte des "Logical Views" nach Fachdomäne	96
Tabelle 9:	Inhaltliche Detaillierung mittels operativer und strategischer Methoden sowie relevanter Artefakte des "Process Views" nach Fachdomäne	97
Tabelle 10:	Inhaltliche Detaillierung mittels operativer und strategischer Methoden sowie relevanter Artefakte des "Physical Views" nach Fachdomäne	98
Tabelle 11:	Inhaltliche Detaillierung mittels operativer und strategischer Methoden sowie relevanter Artefakte des "Lifecycle Views" nach Fachdomäne	99
Tabelle 12:	Übersicht der Validierungsszenarien der DMAICS-Methodik	135
Tabelle 13:	Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 1	138
Tabelle 14:	Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 2	140

Tabelle 15: Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 3.....	142
Tabelle 16: Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 4.....	144
Tabelle 17: Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 5.....	147
Tabelle 18: Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 6.....	149
Tabelle 19: Bewertung der DMAICS-Methodik hinsichtlich des Erfüllungsgrades formaler Gütekriterien.....	150

1 Einleitung

Digitale Technologien aus den Bereichen Internet der Dinge, cyberphysische Produktionssysteme, Cloud und künstliche Intelligenz bieten der produzierenden Industrie neue Potentiale zur Produkt- und Prozessoptimierung. Mit der Digitalisierung streben Unternehmen neben einer Verbesserung der klassischen Zielgrößen Zeit, Qualität und Kosten auch eine Steigerung der Flexibilität und Reaktionsfähigkeit in Hinblick auf neue Geschäftsmodelle und externe Einflüsse an [1–3]. Die vollständige Digitale Transformation im Produktionsumfeld, welches sich durch eine heterogene Anlagen- und Systemlandschaft kennzeichnet, erfordert neben dem technischen auch einen kulturellen Wandel. Aufgrund sich rasch entwickelnder Technologien wird den Unternehmen und Mitarbeitenden ein hoher Veränderungswille sowie eine hohe Anpassungs- und Innovationsfähigkeit neben der Aufrechterhaltung der Kernprozesse der Produktion abverlangt. Anlässlich dieser immanenten sozialen und technischen Komplexität stellt die Implementierung der digitalen Transformation produzierende Unternehmen vor Herausforderungen [4, 5].

Die digitale Transformation erfordert eine gemeinsame Herangehensweise und eine überspannende Zusammenarbeit aller Betriebsfunktionen und Fachdomänen, wie z.B. Innovation, Forschung und Entwicklung (F&E), Supply Chain Management (SCM), Information Technology (IT) oder Operational Technology (OT). Um diesem Bedarf Sorge zu tragen, wurde die in dieser Dissertationsschrift vorgestellte DMAICS-Methodik entwickelt. Die Forschungsthese dieser Arbeit lautet:

Der komplexe Transformationsprozess der Digitalisierung im Produktionsbereich lässt sich mittels eines methodengestützten Vorgehensmodells (DMAICS-Zyklus) vollumfänglich und anwendungsagnostisch umsetzen.

Die DMAICS-Methodik folgt einem systemischen Ansatz. Dabei werden die der Digitalisierung zugrundeliegenden Vorgänge und deren Wechselwirkungen anhand von Beobachtungen aus der Praxis und Literaturrecherchen synthetisiert sowie hinsichtlich potenzieller Effektivitäts- sowie Effizienzgewinne analysiert. Anschließend werden diese Vorgänge in organisationsüberspannenden Prozessmodellen geordnet und durch methodische Vorgehensweisen angereichert. Hierzu werden, sofern vorhanden, bestehende Methoden aus der Literatur systematisiert, andernfalls bestehende Lücken durch neue Methoden geschlossen. Das Abstimmen der Ein- und Ausgaben aufeinanderfolgender Vorgänge fördert eine

konstruktive und effiziente Zusammenarbeit. Zudem soll die durchgängige Strukturierung des Vorgehens sowie das Forcieren einer einheitlichen Taxonomie die Kommunikations- und Orientierungsfähigkeiten aller Beteiligten des Digitalisierungsprozesses verbessern. Der Aufbau der Arbeit wird in Bild 1 illustriert.

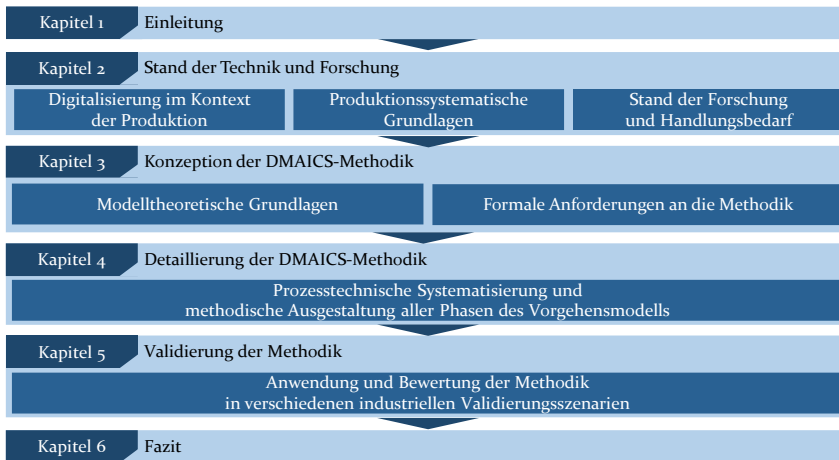


Bild 1: Aufbau der vorliegenden Dissertationsschrift

Einleitend werden Begrifflichkeiten und der Status Quo der Digitalisierung im Kontext der Produktion und produktionssystematischen Grundlagen dargelegt. Auf der Basis einer kritischen Auseinandersetzung mit bestehenden Ansätzen im Forschungsfeld wird zum Stand der Technik und Forschung der Handlungsbedarf abgeleitet, welcher den inhaltlichen Anforderungen an die Methodik entspricht (Kapitel 2). In Kapitel 3 wird das Vorgehensmodell der DMAICS-Methodik vorgestellt. Die Methodikmodellierung erfolgt aufbauend auf dem Methodikmodell nach Jenke und unter Verwendung des Modellierungsstandards der *Business Process Model and Notation 2.0 (BPMN 2.0)*. In Ergänzung zu den bereits definierten inhaltlichen Anforderungen werden formale Anforderungen an die Methodik definiert. In Kapitel 4 wird die Methodik in Form eines durchgängigen Prozessmodells und dessen methodische Ausgestaltung detailliert. Dabei wird der Digitalisierungsprozess zur Harmonisierung aller Teilaktivitäten systematisiert und standardisiert. Die Spezifikation des Digitalisierungsprozesses eignet sich zur Implementierung in Form eines Informationssystems, welches Unternehmen bei der digitalen Transformation anleitet und dabei Transparenz über die Kausalketten der Digitalisierung schafft. Die Korrektheit und Anwendbarkeit der Methodik wird in verschiedenen industriellen Anwendungsszenarien validiert (Kapitel 5). Zusammenfassend wird in Kapitel 6 ein Fazit bezüglich der eingangs aufgestellten These gezogen.

2 Stand der Technik und Forschung

Der Stand der Technik und Forschung gliedert sich in drei Unterkapitel. Erstens wird in Kapitel 2.1 das Themengebiet der Digitalisierung im Produktionsumfeld vertieft, indem der Digitalisierungsbegriff semantisch geschärft, bestehende Digitalisierungskonzepte systematisiert sowie neue technische Entwicklungstrends im Hinblick auf deren Einsatz im Produktionsbereich bewertet werden. Als Zweites werden in Kapitel 2.2 produktions-systematische Grundlagen thematisiert, die für eine systemische Betrachtung produzierender Unternehmen notwendig sind. Drittens werden zur kritischen Würdigung des Stands der Forschung im Forschungsfeld existierende Ansätze kriterienbasiert analysiert sowie davon ausgehend der Handlungsbedarf abgeleitet.

2.1 Digitalisierung im Kontext der Produktion

Zur Beschreibung des Stands der Technik der Digitalisierung im Produktionsbereich wird der Begriff der Digitalisierung in Kapitel 2.1.1 zunächst systematisiert und das in dieser Arbeit zugrunde gelegte Begriffsverständnis definiert. Zur ganzheitlichen Betrachtung des Einsatzes digitaler Technologien werden bestehende Vorgehensweisen in Kapitel 2.1.2 erläutert, die sich in die drei Lebenszyklusphasen *Entwicklung*, *Betrieb* und *Support* gliedern lassen. Anschließend werden in Kapitel 2.1.3 relevante Digitalisierungsansätze aus der Literatur systematisiert und in Verbindung mit den Gestaltungsprinzipien des Lean-Managements gebracht. Ein spezieller Gesichtspunkt der Digitalisierung im Produktionsbereich ist die teils historisch, teils technologisch bedingte Zweiteilung in Operational Technology (OT) und Information Technology (IT). Im Zuge der vertikalen Vernetzung findet eine zunehmende Verknüpfung beider Bereiche statt. Sowohl diese als auch technische Limitationen werden in Kapitel 2.1.4 thematisiert. Neben den technologischen Aspekten werden in Kapitel 2.1.5 kulturelle Aspekte der Digitalisierung beleuchtet. Während die Digitalisierung auf der einen Seite als technologischer Befähiger zum Komplexitätsmanagement benötigt wird, nimmt die Komplexität des Produktionssystems auf der anderen Seite durch die Injektion digitaler Lösungen selbst zunächst zu. Anschließend wird der Komplexitätsbegriff in Kapitel 2.1.6 systematisiert und der methodische Umgang zur Prävention, Reduktion und Beherrschung von Komplexität aufgezeigt.

2.1.1 Klärung von Begriffen

Im Fokus dieser Arbeit steht ein methodengestütztes Vorgehensmodells zur vollumfänglichen und anwendungsagnostischen Digitalisierung in der Produktion. Der Begriff Digitalisierung subsummiert dabei vier Bedeutungsinhalte, welche miteinander in Zusammenhang stehen (vgl. Bild 2).

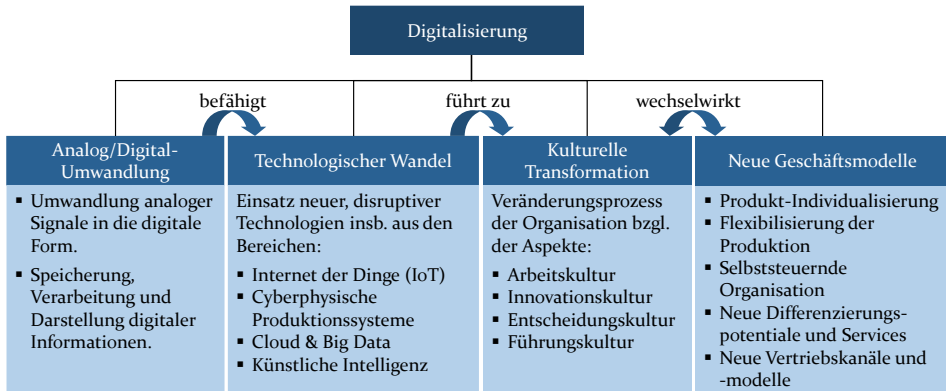


Bild 2: Bedeutungsinhalte des Begriffs Digitalisierung und ihre Zusammenhänge [1, 5–11]

Den ersten Bedeutungsinhalt stellt die Umwandlung analoger Signale und Informationen in die digitale Form dar und bildet somit die Grundlage einer jeden digitalen Technologie. Beispiele für die *Analog/Digital-Wandlung* sind die Umwandlung eines analogen, zeit- und wertkontinuierlichen Spannungssignals in ein zeit- und wertdiskretes digitales Signal oder das Einscannen eines Dokumentes. Weiterhin werden auch Vorgänge zur Speicherung, Verarbeitung und Darstellung digitaler Daten zur Information und Kommunikation unter diesem Bedeutungsinhalt verstanden [8].

Den zweiten Bedeutungsinhalt bezeichnet der *technologische Wandel* durch den Einsatz von digitalen Technologien und Systemen zur Verbesserung der Effizienz, Qualität und Flexibilität in der Fertigung von Produkten. Hierbei galt die Digitalisierung gegen Ende des 20. Jahrhunderts vor allem der Automatisierung, der Verbesserung der Informationsverarbeitung durch Office-Anwendungen, den Informationssystemen sowie der Schaffung von Computernetzwerken. Seit Beginn des 21. Jahrhunderts stehen jedoch vermehrt disruptive Technologien im Fokus [8]. Dies wird auch als die vierte industrielle Revolution oder Industrie 4.0 (I4.0) bezeichnet, für welche in Abgrenzung zur vorherigen dritten industriellen Revolution Frank et al. die vier Basistechnologien *BigData*, *Analytics*, *Internet of Things (IoT)* und *Cloud* identifizieren [1]. *Analytics* subsummiert dabei den Bereich der Künstlichen Intelligenz. Eine klare Trennung der dritten und

vierten industriellen Revolution in technischer Hinsicht ist aufgrund der Parallelen und Zusammengänge weder möglich noch sinnvoll [9]. In der Literatur wird I4.0 daher vielmehr als eine evolutionäre Weiterentwicklung von Industrie 3.0 betrachtet [10].

Der technische Wandel und die damit einhergehenden Anforderungen führen auch zu einer kulturellen Transformation, welche den dritten Bedeutungsinhalt von Digitalisierung darstellt. Roucoules und Anwer benennen daher *Kultur* als eine eigene Dimension zur Bewertung der I4.0-Reife von Unternehmen [12]. In Hinblick auf die Arbeitskultur verändert Digitalisierung, die benötigten Arbeits- und Denkweisen sowie Kompetenzprofile der Mitarbeitenden. Die Innovationskultur von Unternehmen beschreibt, wie gut Unternehmen in der Lage sind, die richtigen Digitalisierungspotentiale zu erkennen und umzusetzen. Weitere Implikationen des kulturellen Wandels betreffen etwa die Führungs- und die Entscheidungskultur [7, 11] (siehe Kapitel 2.1.5).

Als vierte Bedeutungsinhalt bezeichnet Digitalisierung den Wandel hin zu *neuen Geschäftsmodellen* etwa durch eine Individualisierung von Produkten, neue Differenzierungspotentiale oder Vertriebskanäle und -modelle [6]. Die Definition von Geschäftsmodellen liegt im Verantwortungsbereich der strategischen Unternehmensführung. Die Digitalisierung im Produktionsumfeld fokussiert daher vielmehr die Umsetzung bzw. die Befähigung und nicht die Vorgabe von neuen Geschäftsmodellen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff der Digitalisierung unter Berücksichtigung aller vier genannten Bedeutungsinhalte wie folgt aufgefasst und definiert:

Digitalisierung bezeichnet den technologischen sowie kulturellen Veränderungsprozess produzierender Unternehmen zur Ausschöpfung neuer Potentiale im Kontext der Produkt- und Prozessoptimierung bis hin zur Befähigung neuer Geschäftsmodelle, welche durch den Einsatz digitaler Lösungen im Produktionsumfeld entstehen.

Abgrenzung zur „Digitalen Fabrik“

Ein verwandter Begriff zur Digitalisierung in der Produktion ist die „Digitale Fabrik“ (DF), die nach VDI-Richtlinie als ein „Oberbegriff von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen, welche durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden“ beschrieben wird [13]. Zur Differenzierung des Fokus dieser Arbeit von dem Themenbereich der Digitalen Fabrik werden beide Begriffe in

Bild 3 in die zentralen Wertschöpfungsketten produzierender Unternehmen eingeordnet, die den Produkt- und Produktionsentstehungsprozess sowie den Auftragsabwicklungsprozess darstellen. Aus produktionssystematischer Sicht ist der Erste dem Production Lifecycle Management (PLM) und der Zweite dem Supplychain Management (SCM) zuzuordnen.

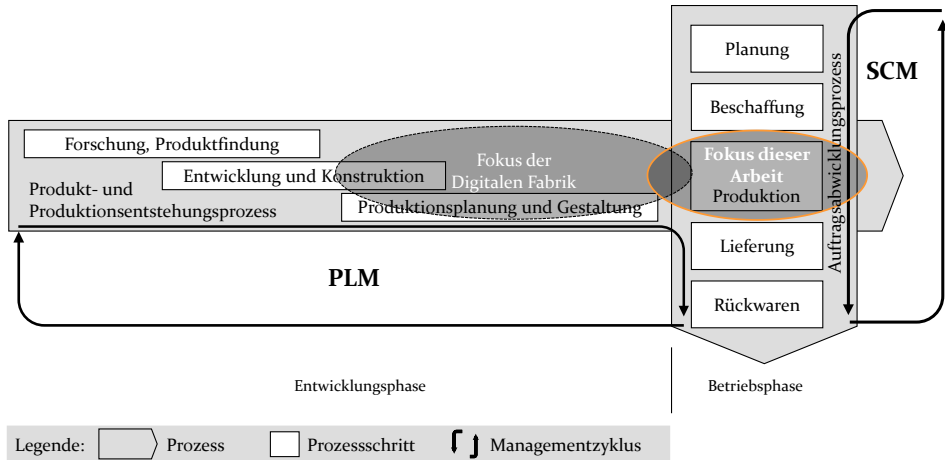


Bild 3: Einordnung des Begriffs Digitale Fabrik sowie des Fokus dieser Arbeit in die zentralen Wertschöpfungsketten produzierender Unternehmen i.A.a. [13]

Die digitale Fabrik unterstützt die Prozesse der Fabrikplanung und lässt sich somit in die Entwicklungsphase der Fabrik bis hin zu deren Hochlauf einordnen. Der Fokus dieser Arbeit liegt hingegen auf der Optimierung des kontinuierlichen Veränderungsprozesses, der begleitend zum Produktionsbetrieb stattfindet. Zum einen besitzt der kulturelle und technologische Wandel der Digitalisierung einen evolutionären Charakter. Zum anderen kann man so dem emergenten Systemverhalten des jeweiligen Unternehmens gerecht werden. Auch wenn die Betrachtungsfokuse nicht identisch sind, so ist eine engere Einbindung der Modelle und Werkzeuge der Digitalen Fabrik in den Produktionsbetrieb im Zuge der Digitalisierung zu erwarten, z.B. durch Integration in den kontinuierlichen Verbesserungsprozess, die automatisierte Generierung von Anlagensteuerungscodes oder die Erstellung von Stücklisten auf Basis von Produktmodellen [14]. Neben den Schnittstellen zu den PLM-Prozessen bilden die Schnittstellen zu den vor- und nachgelagerten SCM-Prozessen ein wesentliches Merkmal der Digitalisierung der Produktion, z.B. beim Austausch von Auftrags- und Lieferinformationen sowie der Rückverfolgbarkeit von Produktionsinformationen.

Effektivität und Effizienz

Das Ziel der Anwendung der in dieser Arbeit vorgestellten DMAICS-Methodik ist mitunter das Heben von Effektivitäts- und Effizienzpotentialen bei der Digitalisierung im Produktionsbereich. Die Begriffe Effektivität und Effizienz werden in der Literatur in verschiedenen Kontexten, u.a. Sportwissenschaften [15], Medizin [16], Informatik [17] leicht unterschiedlich verwendet, stellen jedoch stets sich ergänzende Kriterien für die Leistungsmessung dar. Effektivität wird im Allgemeinen synonym als ein Maß der Wirksamkeit oder Grad der Zielerreichung verwendet. Effizienz hingegen gilt als Maß für die Wirtschaftlichkeit (vgl. ökonomisches Prinzip [18]). Die wohl bekannteste Definition und Unterscheidung der beiden Begrifflichkeiten Effizienz und Effektivität im Unternehmenskontext prägte der amerikanische Ökonom Peter Drucker 1963 mit folgendem Zitat:

“It is fundamentally the confusion between effectiveness and efficiency that stands between doing the right things and doing things right. There is surely nothing quite so useless as doing with great efficiency what should not be done at all.” [19]

Hierdurch geht einprägsam hervor, dass Effektivität bedeutet, die richtigen Dinge zu tun und dass Effizienz im weiteren Sinne die Wirtschaftlichkeit des Tuns bedeutet. Weiterhin betont Drucker mit seinem Zitat, dass eine fehlende Effektivität einer Maßnahme nicht durch eine hohe Effizienz ausgeglichen werden kann. Beide Beurteilungskriterien lassen sich wie folgt formelmäßig beschreiben:

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Ergebnis}}{\text{Aufwand}} \quad (1)$$

$$\text{Effektivität} = \frac{\text{Ergebnis}}{\text{Ziel}} \quad (2)$$

Nach Formel (1) beschreibt Effizienz die Wirtschaftlichkeit eines Vorhabens durch das Verhältnis von Ergebnis und Aufwand. Im Projektmanagement eignet sich diese Definition ebenso in der Planungsphase wie im Controlling. Hierbei wird das Ergebnis ggf. nicht direkt, sondern in Form des erwarteten bzw. realisierten *Nutzens* ausgedrückt. Formel (2) beschreibt Effektivität im Sinne des „Grads der Zielerreichung“ als Quotient aus erzielttem Ergebnis und geplantem Ziel. Beide Begriffsdefinitionen werden in dieser Arbeit konsistent verwendet, um schlussendlich auf Basis einer verbesserten Effektivität sowie Effizienz auf eine erfolgreichere Digitalisierung in produzierenden Unternehmen schließen zu können.

2.1.2 Lebenszyklusbetrachtung digitaler Lösungen

Das aktuelle Unterkapitel zeigt einen Überblick über den Lebenszyklus digitaler Lösungen auf und liefert relevante Implikationen für deren Einsatz in produzierenden Unternehmen auf. Für eine detaillierte Lebenszyklusbetrachtung wird der in Bild 4 illustrierte Softwarelebenszyklus nach Balzert als Referenzmodell verwendet.

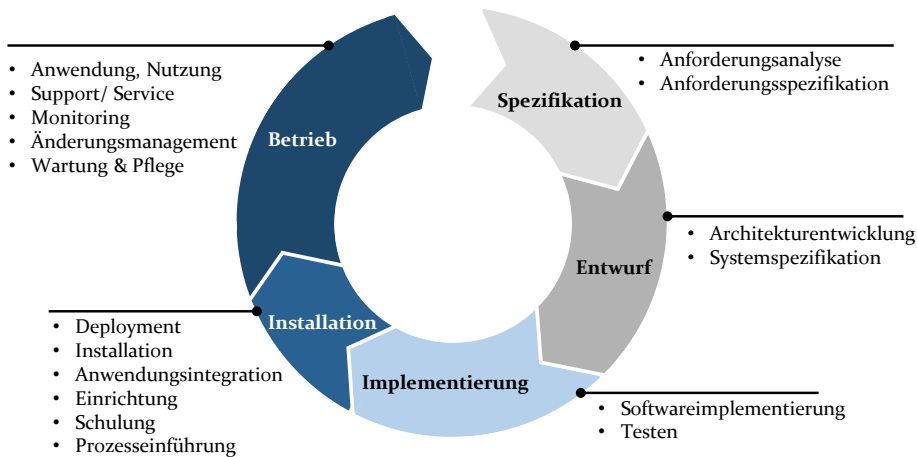


Bild 4: Softwarelebenszyklus i.A.a. [20] sowie Einordnung zugehöriger Unteraktivitäten

Die erste Phase stellt die Spezifikation des Zielsystems dar. Praktiken zur Erstellung der Anforderungsspezifikation finden sich in einschlägigen Fachbüchern des Requirements Engineerings, z.B. [21, 22]. Als Qualitätsmerkmale guter Anforderungen definieren Wiegers und Beatty u.a. die *Verständlichkeit*, *Eindeutigkeit*, *Nachweisbarkeit*, *Widerspruchsfreiheit*, *Vollständigkeit* und *Testbarkeit* [23] des Systems.

Die zweite Phase befasst sich mit dem Entwurf der digitalen Lösung. Aus Sicht des produzierenden Unternehmens sind für den Entwurf des Zielsystems die nachgelagerten Phasen ganzheitlich zu betrachten, um eine spätere *Integrierbarkeit*, *Betriebbarkeit* und *Wartbarkeit* der Lösung zu gewährleisten [20]. Relevante Festlegungen der Architekturentwicklung betreffen die *Systemstrukturen*, die einzusetzenden *Architekturmuster* sowie die *Technologieauswahl* [24, 25]. Vor dem Hintergrund des Cloud-Computings stellt sich zudem die Frage, welche Bestandteile des Zielsystems On-Premises bzw. in der Cloud verwaltet werden. Grundlegend lassen sich drei Ebenen der Integrationstiefe der Cloud in Form von *Infrastruktur as a Service (IaaS)*, *Platform as a Service (PaaS)* sowie *Software as a Service (SaaS)* unterscheiden [26]. Üblicherweise formulieren die IT-

Governance (vgl. COBIT [27]) sowie die unternehmensintern vorherrschenden Strategiemuster die Rahmenbedingungen für die Architekturentwicklung.

Für die Implementierung von digitalen Lösungen existieren in der Literatur verschiedene Vorgehensweisen, welche im Kern entweder auf dem sequenziellen oder dem inkrementellen Modell basieren. Grundsätzlich ist bei der Entwicklung komplexer Softwaresysteme der Trend weg von sequenziellen hin zu agilen Entwicklungsvorgehensweisen zu beobachten, der sich auch in dem rapide zunehmenden Angebot agiler Entwicklungswerkzeuge und einer stetig zunehmenden Publikationsanzahl im Themenbereich abzeichnet [28]. Inkrementelle Entwicklungsmodelle gehen mit den wesentlichen Vorteilen der Anpassbarkeit sowie der Risikominimierung einher. Zudem entsteht das Potential, entwickelte Inkremente bereits vor Fertigstellung des finalen Produkts kontinuierlich in Betrieb zu nehmen, wie dies z.B. in der DEVOPS-Methodologie vorgesehen ist [29]. Die Nutzung dieses Mehrwerts ist logischerweise nur dann möglich, sofern die Aktivitäten der nachfolgenden Installationsphase entsprechend ökonomisch und zeitlich effizient sind und keinen Flaschenhals darstellen. Als ein potenzielles Szenario des Produktionsbereichs, welches eine Anwendung der DEVOPS-Methodologie erfordert, sind Machine Learning-basierte Systeme zu nennen, da diese ggf. aufgrund sich ändernder Rahmenbedingungen ein wiederholtes Training benötigen (vgl. MLOPS [30]). Hingegen sind bei Digitalisierungslösungen mit einem hohen Automatisierungsteil, z.B. cyberphysischen Produktionssystemen, bedingt durch die vorliegenden Hardwarelimitationen iterative bis lineare Entwicklungsmodelle (z.B. V-Modell) anzuwenden [31].

Die Installation digitaler Lösungen umfasst alle Aktivitäten von der Verteilung über die Installation bis hin zu der Einrichtung und Anwenderschulung eines Systems. Im Produktionsbereich geht mit der Einführung neuer Systeme in der Regel das Abprüfen branchenspezifischer sowie rechtlicher Vorschriften, z.B. die Einhaltung der Datenschutz-Grundverordnung für die Verarbeitung personenbezogener Daten (DSGVO), einher [32]. Zur Betriebsphase von digitalen Systemen fallen neben der reinen Nutzung auch Aufwände zu deren Administration, Anwenderunterstützung und Überwachung. Weiterhin unterliegen Softwaresysteme meist einer stetigen Weiterentwicklung, Optimierung und Anpassung. Die Verwaltung verschiedener Versionen und Software-Patches sowie etwaige Ausphasungen und Konsolidierungsmaßnahmen fallen dabei in den Aufgabenbereich des Servicemanagements, für das sich die Verwendung des *ITIL-Leitfadens* etabliert hat [33].

In Bezug auf diese Arbeit dient der Softwarelösungszyklus einer holistischen Betrachtung von Entwicklungs-, Integrations- und Betriebsaufwänden, welche bei der Einführung neuer Softwarelösungen in Abhängigkeit von der Integrationstiefe entstehen. Diese sind insbesondere bei der Rentabilitätsbetrachtung neuer Softwarelösungen sowie der Abwägung von Lösungsalternativen bzw. Make-or-Buy-Entscheidungen bei der Konzeptentwicklung zu berücksichtigen.

2.1.3 Konzeptionelle Verbindung der schlanken Produktion und Industrie 4.0

Der Begriff der schlanken Produktion ist die wörtliche Übersetzung des englischen Begriffs *Lean Production*, der durch Krafcik 1988 im Rahmen einer Beurteilung japanischer und westlicher Produktionssysteme definiert wurde. Als Benchmark für die schlanke Produktion wird das Toyota-Produktionssystem (TPS) gesehen. Krafcik kommt zu dem Schluss, dass schlanke Produktionssysteme gepufferten (engl. *buffered*) Systemen hinsichtlich Produktivität, Qualität und Mix-Komplexität überlegen sind. Jedoch weist er auch auf die inhärenten Risiken von Lean-Produktionsrichtlinien hin, die z.B. durch einen Wegfall von Sicherheitsbeständen entstehen [34].

Die Gestaltungsprinzipien der schlanken Produktion finden sich in denen ganzheitlicher Produktionssysteme wieder [35]. Diese lauten nach VID 2870: *Vermeidung von Verschwendung, kontinuierliche Verbesserung, Standardisierung, Null-Fehler-Prinzip, Fließprinzip, Pull-Prinzip, Mitarbeiterzentrierung sowie visuelles Management* [36].

Der Begriff Industrie 4.0 (I4.0) geht auf eine gleichnamige strategische Initiative der deutschen Bundesregierung im Rahmen der Hightech-Strategie zurück. Basierend auf den vier Gestaltungsprinzipien *Vernetzung, Informationstransparenz, technische Assistenz und dezentrale Entscheidungen* zielt I 4.0 auf eine *Flexibilisierung der Produktion, wandelbare Fabriken, kundenzentrierte Lösungen, die Optimierung der Logistik, die Nutzung von Daten* und eine *ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft* ab [3, 37].

Trotz der teils unterschiedlichen zugrundeliegenden Paradigmen und Herangehensweisen zeigen diverse Forschungsarbeiten, dass beide Philosophierichtungen nicht im Widerspruch zueinander stehen, sondern sich vielmehr ergänzen [38–40]. Dombrowski et al. teilen die Wechselwirkungen zwischen Lean und I4.0 in die vier Kategorien ein [39]:

- Lean als Grundlage für I4.0

- Vervollständigung von Lean-Ansätze durch I4.0-Technologien
- Erhöhung der Effizienz von Lean-Methoden durch I4.0
- Veränderung von Lean-Prinzipien in Folge des technologischen Fortschritts

Im Folgenden wird ein Überblick über relevante *Lean-Methoden* und *I4.0-Technologien* gegeben. Anschließend werden konzeptionelle Verbindungen beider Paradigmen in Bild 5 dargestellt und erläutert [41].

Zentrale Lean-Methoden gehen auf das Toyota-Produktionssystem, welches von Toyoda Sakichi begründet wurde, zurück [42]:

- **Just in time (JIT)/ Just in sequence (JIS):** Lieferung von Materialien in der richtigen Menge, zur richtigen Zeit an den richtigen Ort; bei JIS zusätzlich abgestimmt auf die Produktionsreihenfolge
- **Kanban:** Steuerungsverfahren nach dem Pull-Prinzip mittels Kanban-Karten
- **Heijunka:** Harmonisierung des Produktionsflusses durch Nivellieren und Glätten der Produktionsaufträge
- **Visuelles Management (VM):** Einsatz visueller Mittel (z.B. Informationstafel, Andon-Ampel) zur effektiven Information von Mitarbeitenden über das komplexe Produktionsgeschehen
- **Total Productive Maintenance (TPM):** Verbesserung der Anlageneffizienz durch präventive und effiziente reaktionäre Maßnahmen

Ebenfalls lassen sich I4.0-Technologien kategorisieren [6, 38, 1]:

- **Cyber-physische Produktionssysteme (CPPS):** CPPS bestehen aus autonomen Produktionsanlagen und Transportsysteme, deren Betrieb mittels integrierter Rechen- und Kommunikationseinheiten überwacht, geregelt und koordiniert werden [43]. Durch entsprechende Mensch-Maschine-Schnittstellen sehen sog. Sozio-CPS auch bidirektionale Interaktionen von Mensch und CPS vor [44].
- **Internet of Things (IoT):** IoT bezeichnet die digitale Vernetzung physischer Geräte und Objekte. Schlüsseltechnologien des IoTs sind eingebettete Sensoriken, wie sie bspw. in intelligenten Containersystemen eingesetzt werden und Auto-ID-Verfahren zur automatisierten Identifikation von Produkten. Softwareseitig ermöglicht die Etablierung neuer Datenübertragungsstandards die Maschine zu Maschine-Kommunikation. IoT-Lösungen dienen der Optimierung von Wertschöpfungsketten durch eine Erhöhung der vertikalen Integrationstiefe [45].

- **Cloud Computing:** Nutzung von Computerressourcen (Infrastruktur, Plattformen, Anwendungen) über das Internet mit Self-Service-, Vernetzungs-, Ressourcenteilungs-, Skalierungs- und Leistungsmessungs- und -steuerungs-Funktionalitäten [46].
- **Digitaler Zwilling:** Paradigma zur Nutzung virtueller Abbildungen physischer Systeme zu deren Visualisierung, Überwachung, Simulation und Steuerung [P1].
- **Data Analytics:** Inspektion, Aufbereitung und Modellierung von Daten zur Gewinnung von Informationen, zum Ziehen von Schlüssen sowie zur Unterstützung in Entscheidungsprozessen. Hierbei lassen sich explorative, deskriptive, konfirmatorische und präskriptive Datenanalysen unterscheiden [47]. Aufbauend auf statistischen Verfahren werden hierbei auch Verfahren des maschinellen Lernens zur Modellbildung eingesetzt, insbesondere zur Analyse großer, schnelllebigiger und komplexer Datenmengen (Big Data) [48].

In einer konzeptionellen Verbindung der genannten Lean-Methoden und I4.0- Technologien zeigen Mayr et al. Synergieeffekte auf (vgl. Bild 5).

Lean Methoden		Just in time/sequence	Kanban	Heijunka	Wertstrom-analyse	Visuelles Management	Total Productive Management
Industrie 4.0 Technologien							
Internet der Dinge	Intelligente Container	x	x			x	
	Auto-ID	x	x		x		
Cyberphysische Produktionssysteme	Fahrerlose Transportsysteme	x	x		x		
	Autonome Produktionsanlagen			x		x	x
Cloud Computing	Skalierbarkeit	x	x	x			
	Plattformen				x	x	x
Digitaler Zwilling	Überwachung	x	x	x		x	
	Simulation	x	x				x
Große Datenmengen & Datenanalyse	Data Mining				x	x	x
	Vorhersage			x			x

Bild 5: Konzeptionelle Verbindung von Industrie 4.0 Technologien und Lean Methoden i.A.a. [1, 38]

Die aus der Kombination beider Paradigmen resultierenden Ansätze, werden als sog. Lean 4.0-Methoden bezeichnet. Beispiele hierfür sind [38]:

- **JIT/JIS 4.0:** Optimierte Materialbereitstellung durch den Einsatz fahrerloser Transportsysteme, sich selbst identifizierender Produkte (smart products), intelligenter Behältersysteme und Datenanalysen

- **VM 4.0:** Effizientere Etablierung der 5S-Arbeitsgestaltung (Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu und Shitsuke) durch den Einsatz von Technologien zur automatischen Identifikation sowie zur Augmentierung der Realität (AR); verbesserte Informationsbereitstellung und -visualisierung durch den Einsatz digitaler Modelle und webbasierter Dashboarding-Werkzeuge
- **Kanban 4.0:** Reduzierung von Umlaufbeständen aufgrund optimierter Auslegung von Losgrößen und Lieferfrequenz mittels Materialflusssimulation sowie durch verbesserte Transparenz mit Hilfe von Auto-ID-Technologien.
- **TPM 4.0:** Optimierte Maintenance Anweisungen durch die Nutzung von AR-Technologie, vorausschauende Wartung und Zustandsüberwachung auf Basis von Datenanalysen, kürzere Inbetriebnahmezeiten durch virtuelle Simulation mit Digitalem Zwilling des Fertigungssequiments

Für die Digitalisierung bedeutet dies, dass etablierte Produktionssysteme, wie etwa das TPS, den Ausgangspunkt bzw. das Rahmenkonzept für die Produktion definieren. Innerhalb dieser Grundordnung ergeben sich durch den Einsatz digitaler Lösungen weitere Verbesserungspotentiale. Handlungsbedarf besteht in einem interdisziplinären Ansatz, welcher diese produktionsspezifischen Potentiale vollständig identifiziert und aufwandsideale Lösungskonzepte entwickelt. Weiterhin gilt es einen solchen interdisziplinären Ansatz in die Ablauforganisation produzierender Unternehmen zu integrieren.

2.1.4 Konvergenz von Informations- und Betriebstechnik

Nach Gabler umfasst die Informationstechnik (IT) „im engeren Sinne alle technischen Ressourcen, die der *Generierung, Speicherung, Archivierung* und *Verwendung* digitaler Informationen dienen. Im weiteren Sinne gehört auch die *Übertragung* der Informationen mittels Kommunikationstechnologie dazu“ [49]. Als Betriebstechnik, für die im deutschen Sprachgebrauch auch der englische Begriff Operational Technology (OT) geläufig ist, wird hingegen Hard- und Software zum *Monitoren* und/oder *Steuern* industrieller Anlagen, Güter, Prozesse und Ereignisse bezeichnet [50]. Trotz vieler Parallelen weisen beide Technologiebereiche eine weitgehend eigenständige Entwicklungshistorie auf. Noch heute lassen sich die Zuständigkeiten und Zielstellungen von IT und OT voneinander abgrenzen (vgl. Bild 6).

Bild 6 weist übergeordnete Informationssysteme der *Unternehmens-* und *Betriebsleitebene*, wie Enterprise-Resource-Planning Systeme (ERP)

vollständig und Manufacturing Execution Systeme (MES) schwerpunktmäßig, zum Zuständigkeitsbereich der IT. Zu diesem zählen weiterhin die mit den genannten Systemen verbundene *Server-Infrastruktur*, die traditionellerweise On-Premises in einem Rechenzentrum oder durch einen Drittanbieter in der *Cloud* zur Verfügung gestellt wird. Ebenso gehören die Bereitstellung von *Softwareanwendungen*, *Kollaborationsplattformen* sowie Hard- und Software für *IT-Arbeitsplätze* (Betriebssysteme, deren Konfiguration, Endgeräte und Peripherie) zum Aufgabenbereich der IT. Für das flexible und erweiterbare Zusammenspiel dieser Technologien werden modulare Architekturmuster, wie beispielsweise die Serviceorientierung, eingesetzt [51]. Dies ermöglicht einen resilienten Betrieb und erfordert gleichzeitig ein hochdynamisches Hinzufügen, Austauschen und Entfernen von Geräten und Kommunikationsteilnehmern. Zur Gewährleistung der Sicherheit eines solchen dynamischen Umfeldes kommen bei IT-Netzwerken dezentrale Sicherheitskonzepte, wie das *Zero-Trust-Model*, zum Einsatz, das jedem Netzwerkteilnehmer vor der Authentifizierung grundsätzlich zunächst mit Misstrauen begegnet. Dies ermöglicht die Realisierung neuartiger IT-Konzepte, wie etwa der Integration privater Endgeräte von Mitarbeitenden in die Unternehmens-IT-Infrastruktur, das auch unter dem englischen Akronym BYOD (*bring your own device*) Bekanntheit erlangt hat [52]. Dieses Beispiel verdeutlicht, weshalb der Aspekt der *Vertraulichkeit* an oberster Stelle der IT-Zielgrößen steht. Diese gilt als Vorbedingung für die Sicherstellung der *Integrität* innerhalb von IT-Netzen, womit korrekte und nachvollziehbare Modifikation von Daten gemeint ist. Diesen beiden Zielgrößen folgt an dritter Stelle die *Verfügbarkeit* des IT-Systems [53].

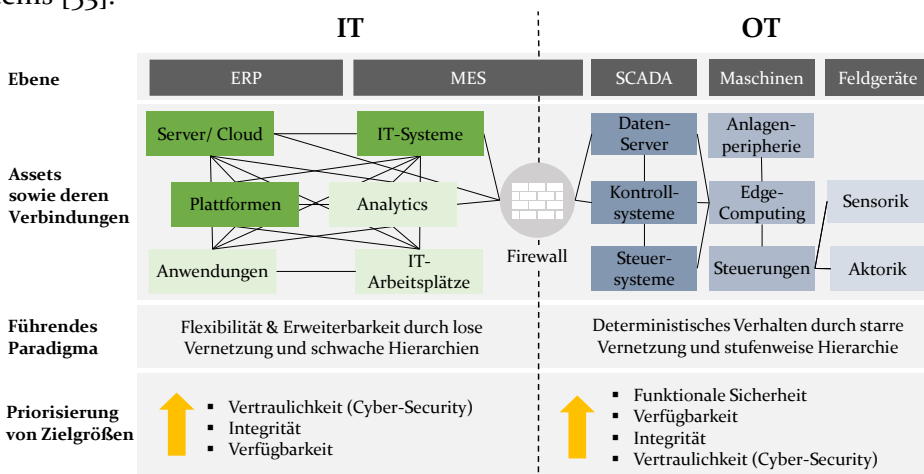


Bild 6: Gegenüberstellung von Information Technology (IT) und Operational Technology (OT) [54, 53, 55, 56]

Ausgehend vom Ebenenmodell der Automatisierungspyramide (vgl. [57]) stellt die Prozessleitebene die oberste Ebene der OT dar. Diese Ebene umfasst übergeordnete *Kontroll- und Steuersysteme* sowie *Datenserver* für die Persistierung historischer Daten. Die darunterliegende Ebene ist die Steuerebene, in der zentrale Recheneinheiten (z.B. Industrie-PCs), die sich unter dem Begriff des *Edge Computings* zusammenfassen lassen, *untergeordnete Steuerungen* und andere *Anlagenperipherien*, wie bspw. Human-Machine-Interfaces (HMIs), verwaltet werden. Auf der Feldebene bilden die über die Steuerungen angebotenen *Aktoren* und *Sensoren* die atomaren Bestandteile einer automatisierten Fertigungsanlage. Im Gegensatz zum IT-Netz, ist die Anzahl an Geräten und Teilnehmern eines OT-Netzes weniger dynamisch veränderlich. Zudem ist die durchschnittliche Lebensdauer von Produktionsanlagen (10-20 Jahre) gegenüber IT-Hardware (3-5 Jahre) deutlich höher [58]. Aufgrund der statischeren Rahmenbedingungen werden in der Praxis weitgehend fest gekoppelte Systeme eingesetzt, die in hierarchischen, kaskadierten Strukturen organisiert werden. Dies ermöglicht auf strukturierte Weise ein beherrschbares und deterministisches Systemverhalten und trägt somit der obersten OT-Zielgröße, der *funktionalen Sicherheit*, bei. Dazu gehört weiterhin die Berücksichtigung von mechanischen, chemischen, elektrischen und radiologischen Gefahren sowie Umgebungseinflüssen und Verschleißerscheinungen [59]. Gängige Sicherheitskonzepte folgen dem „*In Depth-Defense*“-Ansatz, welcher eine schichtweise Sicherung der Systeme vorsieht [60]. Dies stellt sicher, dass etwaige Ausfälle von Teilsystemen durch die jeweils nächsthöheren Instanzen abgefangen werden. Die zweite OT-Zielgröße ist die *Verfügbarkeit* des Produktionssystems, das die grundlegende Durchführbarkeit der Wertschöpfung gewährleistet. Im Gegensatz zu den Zielgrößen der IT stellen *Integrität* sowie die *Vertraulichkeit* bei der Datenverarbeitung zwar wichtige dennoch nicht die obersten Zielgrößen dar. Beispielsweise wird Plug-and-Produce-Funktionalitäten im OT-Bereich zur schnellen Wartung oder das Eingehen von Redundanzen zur hochverfügbaren Signalübertragung ein höherer Stellenwert eingeräumt als der Verschlüsselung der Datenübertragung. Aufgrund der oftmals technologiebedingten Abwesenheit von Authentifizierungsmechanismen wird Cyber-Gefahren durch netzwerktechnische Abschottung (Firewalls) der Systeme in Kombination mit physikalischer Absicherung begegnet [60]. Da eine Verbindung von IT- und OT-Netzen mit Sicherheitsrisiken einhergeht, erfolgt die Koppelung beider Welten über restriktive und überwachte Schnittstellen. Die gegebenen Beschränkungen der OT erfordern eine gesonderte Verwaltung, selbst für Standard-IT-Komponenten. Ansonsten könnte beispielsweise durch

das automatische Einspielen von Sicherheitspatches die Verfügbarkeit des Produktionssystems gefährdet werden.

Im Zuge von I4.0 kommt es durch neue Anforderungen und einer stärkeren und flexibleren Vernetzung beider Seiten zu einer Konvergenz der IT- und der OT-Welt. Dies stellt gestiegene Sicherheits- und Architektur Anforderungen an die OT-Welt. Beispielsweise werden CPPS im IoT zu Zwecken der Fernüberwachung, -steuerung und -wartung an IT-Plattformen angebunden [61]. Im Zuge dessen entstehen weitere Potentiale durch das Einbinden von Drittanbieter-Services, u.a. im Bereich Predictive Maintenance oder KI-Anwendungen. Standardisierte Kommunikationsprotokolle, wie OPC UA, nehmen dabei die Rolle eines essenziellen technischen Befähigers für sichere bidirektionale Kommunikation bis hin zur Steuerungsebene ein [62, S1, S2]. Während die technische Koppelung der IT- mit der OT-Welt grundsätzlich gegeben ist, besteht die Herausforderung in der Berücksichtigung der jeweiligen Zielsetzungen beider Technologiebereiche. Hierzu bedarf es eines methodischen Ansatzes, welcher Interessenskonflikten vorbeugt, die jeweiligen Bereichsstrategien berücksichtigt und damit eine möglichst reibungslose Zusammenarbeit beider Domänen in operativer sowie strategischer Hinsicht befähigt.

2.1.5 Kultureller Wandel im Kontext der Digitalisierung

Mit seinem berühmten Zitat „culture eats strategy for breakfast“ impliziert Drucker, dass die Unternehmenskultur den Unternehmenserfolg unabhängig von der Effektivität einer Strategie maßgeblich bestimmt. Das Gabler-Wirtschaftslexikon definiert Unternehmenskultur als die „Grundgesamtheit gemeinsamer Werte, Normen und Einstellungen, welche die Entscheidungen, die Handlungen und das Verhalten der Organisationsmitglieder prägen.“ [63]. Die Unternehmenskultur ist somit als ein emergentes Phänomen aufzufassen, welches aus den etablierten Verhaltensweisen und Gewohnheiten der Mitarbeitenden hervorgeht und sich somit nur indirekt durch die Förderung und Forderung bestimmter Verhaltensweisen und Gewohnheiten beeinflussen lässt. Der Faktor des kulturellen Wandels kann als Katalysator für die Digitalisierung aufgefasst werden, indem die Organisation als Kollektiv mit angepassten Verhaltensweisen und Gewohnheiten den neuen Anforderungen mit Agilität und Resilienz auf optimierende Weise begegnet. Das aktuelle Unterkapitel eruiert hierzu drei relevante Teilaspekte des kulturellen Wandels: die *Innovationskultur*, die *Entscheidungskultur* und die *Arbeitskultur*. Zudem werden Implikationen auf die Rolle von Führungskräften im Sinne der *Führungskultur* abgeleitet.

Innovationskultur

Innovation prägt die Neuerungs- bzw. Veränderungsfähigkeit von Unternehmen. Dem kommt im Kontext der vierten industriellen Revolution eine abermals verstärkte Bedeutung zu. In Bild 7 werden die vier Kulturtypen nach Cameron und Freeman in zwei Dimensionen betrachtet. Die erste beschreibt das Kontinuum von mechanischen bis hin zu organischen Prozessen. Die zweite betrachtet die Wertlegung auf die interne Erhaltung bzw. die externe Positionierung. In der Praxis weisen Unternehmen in der Regel Mischformen aller vier Kulturtypen auf und unterscheiden sich dabei insbesondere durch die jeweiligen Größenanteile. Der Kulturtyp der Adhokratie weist nicht nur direkte Eigenschaften wie „Innovation“, „Innovator“ oder „Kreativität“ auf, sondern ist, wie Ernst belegt, auch nachweislich am förderlichsten für einen messbaren *Innovationserfolg* [64].

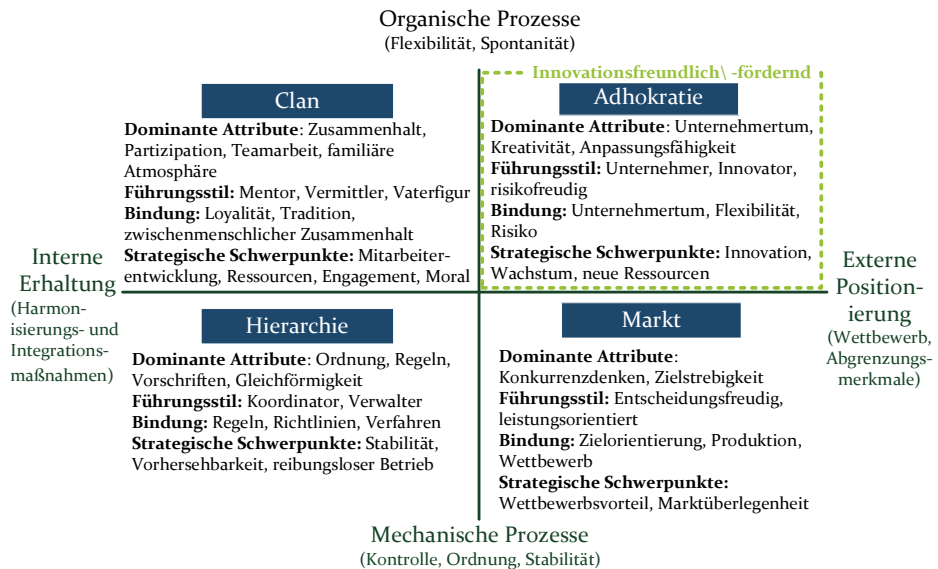


Bild 7: Typologien von Unternehmenskulturen nach Cameron und Freeman [65] sowie Hervorhebung innovationsfreundlicher Merkmale nach Ernst [64]

Als Implikation für produzierende Unternehmen, die aufgrund des Strebens nach Stabilität sowie einem reibungslosen Betrieb stark von hierarchischen Unternehmenskulturen geprägt sind, wird die Schaffung von kreativen Freiräumen abgeleitet. Dies erfordert eine Verankerung von *Innovation als Glaubensgrundsatz* in den Unternehmenszielen und -werten (vgl., Kapitel 2.2.2) und wird weiterhin positiv bedingt durch eine *offene und aktive Fehlerkultur*.

Eine Studie der IHK Innovationsberatung Hessen und der Philipps-Universität Marburg aus dem Jahr 2013 legt in einer Befragung von insgesamt 193 Unternehmen den Status quo des Ideenmanagement in Unternehmen offen. Über 90% der befragten Unternehmen gaben hierbei an, Ideen von Mitarbeitenden einzusammeln. Zudem regen über zwei Drittel der Befragten die Generierung von Ideen auf mindestens befriedigende Weise bei Mitarbeitenden aktiv an. Während die bloße Erfassung von Ideen keinen Mangel darstellt, wird jedoch Handlungsbedarf bei der systematischen Weiterverarbeitung der Ideen ersichtlich. In knapp der Hälfte der Unternehmen haben Mitarbeitende keinen Zugriff auf bereits eingereichte Ideen oder die Information über deren Weiterverfolgung. Feedbackmöglichkeiten zu eingereichten Ideen sind nur in knapp 16% der Unternehmen gegeben. In rund 75% der Fälle werden die Ideen von den Vorgesetzten bewertet. Die Weiterverarbeitung geschieht meist ohne den Einsatz integrierter Softwaretools [66].

In Hinblick auf die Digitalisierung zeigen sich fehlende Transparenz, Rückverfolgbarkeit und Zugänglichkeit im Ideenmanagement als erhebliche Einschränkungen und Risiken. Dies ist damit zu begründen, dass Digitalisierungsideen selten isoliert betrachtet werden können. Sie weisen Schnittstellen zu anderen Systemen auf und interferieren meist mit einer Vielzahl von Stakeholdern. Aufgrund der technischen Komplexität, die in der Regel aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten ist, birgt die Ideenbewertung durch Einzelpersonen ein erhöhtes Risiko für Fehleinschätzungen. Ein zentrales Ideenmanagementsystem, das Feedbackmöglichkeiten einer unternehmensinternen Digitalisierungs- bzw. Expertencommunity (vgl. Bild 13) ermöglicht, stellt hierfür eine denkbare Gegenmaßnahme dar, die zudem die Innovationskultur durch einen frühzeitigen Einbezug der Mitarbeitenden fördert.

Entscheidungskultur

Strategische sowie operative Entscheidungen sind für den Erfolg bzw. Misserfolg des Digitalisierungsprozesses in Unternehmen maßgeblich. Im Hinblick auf die Digitalisierung sind Entscheidungen insbesondere geprägt durch eine hohe technische Komplexität und die Interdependenz der Entscheidungsobjekte. Die aus den Entscheidungen resultierenden Konsequenzen betreffen zudem meist eine Vielzahl an Stakeholdern in oftmals nicht unerheblichem Maße. Definitorisch ist eine Entscheidung eine „Auswahl einer Handlungsalternative (Aktion) aus einer Menge verfügbarer Alternativen“ [67]. In der Psychologie werden nach Kahnemann zwei Systeme zur Entscheidungsfindung des Menschen unterschieden [68]:

- **System 1:** intuitiv, schnell und automatisch
- **System 2:** aufwändig, langsamer und bewusst

Grundsätzlich geht aus dem Stand der Wissenschaft hervor, dass systematische Entscheidungen nach System 2 in komplexen Entscheidungssituationen bessere Resultate erzielen. Eine Ausnahme bilden hierbei Experten, welche aufgrund ihrer langjährigen Tätigkeiten eine Expertise aufgebaut haben und daher auf Basis ihrer Intuition gute Entscheidungen treffen können. Zur Verbildlichung kann dieses Phänomen mit einem Schachspielenden verglichen werden, der sich durch das Wiedererkennen gewisser Spielmuster gedanklicher Abkürzungen bedient. Gladwell benennt als Größenordnung 10.000 h kontinuierlichem und forderndem Trainings unter Voraussetzung einer lernfreundlichen Umgebung mit direktem Feedback, um in einer Domäne über weitreichende Expertise zu verfügen [69]. Entscheidungsprozesse diese lassen sich in drei Phasen einteilen [70]:

- **Präselektionale Phase:** Beschaffung entscheidungsrelevanter Informationen; *objektiv* auf Basis von empirischen Daten und Fakten; *subjektiv* in Form von Schätzungen und Meinungen
- **Selektionale Phase:** Fällern der Entscheidung durch Auswahl einer Handlungsalternative; Voraussetzung der Prinzipien des rationalen Entscheidens (*vollständige Ordnung, Unabhängigkeit, Dominanz, Invarianz*)
- **Postselektionale Phase:** *Reflexion* getätigter Entscheidungen anhand der erzielten Resultate und Konsequenzen sowie Ableitung eines *Lerneffektes* für das zukünftige Entscheidungsverhalten

Zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses existieren eine Mannigfaltigkeit verschiedener Hilfsmittel und Methoden:

- **Checklisten:** Listen von Bewertungs- bzw. K.o.-Kriterien zur Gewährleistung der Vollständigkeit der Betrachtung
- **Zielmodelle:** Aufzeigen von Hierarchiebeziehungen zwischen Entscheidungskriterien
- **Erhebungsverfahren:** Verfahren zur Erhebung von Ist-Werten
- **Prognoseverfahren:** Verfahren zur Prognose von Erwartungswerten (vgl. Bild 42)
- **Verfahren zur Konsensbildung:** Nutzung und Konsolidierung des im Unternehmen verteilt vorliegenden Wissens (z.B. Mehrfachbefragung, Delphi-Methode, Schätzklausur, vgl. Bild 8)
- **Analysemethoden:** Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsfindung (z.B. Nutzwertanalyse, Analytic Hierarchy Process)

- **Entscheidungsregeln:** Regeln zur Steuerung der Affinität bzw. Aversion gegenüber Risiken und Ambiguität (z.B. Laplace-Regel, Savage Niehans Regel, μ - σ -Regel, Bayes-Regel)

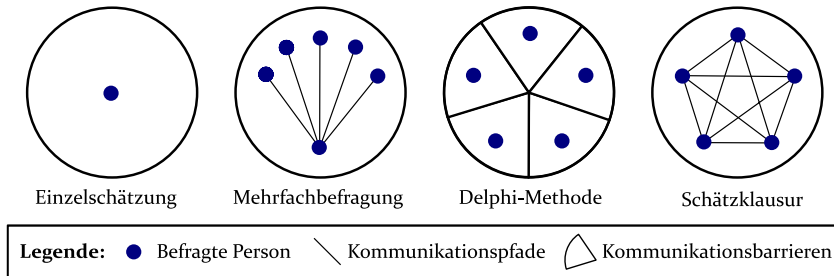


Bild 8: Formen der Expertenbefragung [71]

Im Gegensatz zu bspw. strategischen Fragestellungen existiert bei komplexen Entscheidungssituationen meist keine vollkommene Informationsbasis. Das Delta zwischen vorliegender und sachlich notwendiger Information stellt die *Unsicherheit* dar, welche eine Konsequenz von (un-)vermeidbarem *Unwissen* ist. Nach Knight werden zwei Ausprägungsarten der Unsicherheit differenziert [72]:

- **Risiko** (Ergebnis mit kalkulierbarem Erwartungswert): Unter Rechtfertigung wirtschaftlicher Aspekte kann ein Risiko im Unternehmenskontext rational und im Einklang mit der Risikoaffinität des jeweiligen Unternehmens bewusst eingegangen werden.
- **Ungewissheit** (unbekanntes Ergebnis, nicht kalkulierbar): In der Regel kann Ungewissheit nicht vollständig rational aufgelöst werden und muss daher meist auf Intuition (System 1-Denken) gründen.

Ungeachtet des Chancenpotentials tendiert der Mensch aufgrund seiner Natur zur Risikoaffinität und zur Ambiguitätsaversion. Mit zunehmender Expertise nimmt dieser als Ellsberg-Paradoxon bekannte Effekt jedoch ab [73]. In Hinblick auf die Digitalisierung werden im Folgenden Implikationen einer produktivitätsfördernden Entscheidungskultur abgeleitet. Die Vernetzung sowie die technische Komplexität der Entscheidungsgegenstände erfordert bei zentralen strategischen und operativen Entscheidungen den *Einbezug der jeweils betroffenen Stakeholder und Experten* einen *gemeinschaftlichen Entscheidungsprozess*. Diese Mehrpersonenentscheidungen erfordern eine *transparente* und *systematische Herangehensweise*, die ergänzt durch eine *retrospektive Nachverfolgbarkeit* das Erzielen eines individuellen als auch *kollektiven Lerneffektes* ermöglicht.

Arbeitskultur

Die verbesserten Informations- und Kommunikationsmöglichkeiten der Digitalisierung verändern und beschleunigen die Arbeitswelt auf drastische Weise. Videokonferenzen ersetzen verstärkt analoge Treffen, die technische Erreichbarkeit von Mitarbeitenden, aber auch die Erreichbarkeitserwartung, steigt zudem durch Smartphones und den Einsatz firmeninterner Instant Messaging- oder Networking-Dienste. Eine Studie der Unternehmensberatung McKinsey bezifferte das Potential der Anwendung sozialer Technologien für Wissensarbeiter:innen auf eine Produktivitätssteigerung von 20-25% [74]. Workflow-Management-Tools optimieren die nahtlose Verknüpfung aufeinanderfolgender Tätigkeiten und verbessern somit die Orchestrierung von Prozessen. Die Automatisierung von Prozessen wird außerdem durch Softwareprogramme aus dem Bereich Robot-Process-Automation begünstigt, indem sowohl die Aufwände als auch das erforderliche Know-how herabgesetzt werden [75]. In diesem Kontext beschreibt der Begriff des *digitalen Mindsets* eine grundlegende Kenntnis von bzw. eine Offenheit gegenüber digitalen Werkzeugen und regt zu einer kontinuierlichen Reflexion der Unternehmensprozesse an.

Ein weiterer Veränderungsaspekt der Digitalisierung auf die Arbeitswelt ist der rapide Anstieg an Wissen mit gleichzeitig kürzerer Halbwertszeit [76]. Infolgedessen gewinnt das Wissensmanagement in Unternehmen an Bedeutung. Im Umgang mit Wissen ist grundlegend zwischen explizitem bzw. kodifizierbarem sowie implizitem Wissen zu unterscheiden. Zur Akquirierung, Aufbereitung und Verfügbarmachung von explizitem Wissen spielen Informationssysteme eine zentrale Rolle. In Abhängigkeit des Grads der Verbindlichkeit sowie der Gültigkeitsdauer der Informationen kommen hierzu wahlweise kollaborative Wikis, Content-Management-Systeme, Wissensdatenbanken mit domänenspezifischer Semantik und Struktur oder Lernplattformen zum Einsatz.

Implizites Wissen ist oftmals einer hohen Komplexität und einer kurzen Halbwertszeit geschuldet. Eine direkte Vermittlung von implizitem Wissen von Person zu Person, z.B. mittels *Job Shadowings* oder eines *Trainings on the Job*, kann zielführender sein als den Umweg über eine explizite Kodifizierung des Wissens zu nehmen. Dennoch ist es für den nachhaltigen und systematischen Lernfortschritt des Unternehmens von Zeit zu Zeit notwendig, implizites Wissen in explizites zu externalisieren und damit unternehmensweit einen Kreislauf aus dem Wechsel von implizitem und explizitem Wissen anzuregen [77].

Für die Schaffung eines strukturellen Rahmens einer lernenden Organisation eignen sich agile Arbeitsmethoden wie *Scrum*, *Kanban* oder *Design Thinking*, die zudem den Erwerb notwendiger Fähigkeiten im Umgang mit Komplexität fördern [78]. Hierzu zählen *Flexibilität*, *Neugier*, *Problemlösungsfähigkeiten*, eine *hohe Frustrationstoleranz* sowie eine *hohe Konzentrationsfähigkeit* [79]. Für die Führung agiler Teams, z.B. in der Entwicklung oder Projektleitung, können die vier bipolare Kompetenzanforderungen zusammengefasst werden *Leading and Deciding*, *Supporting and Cooperating*, *Interacting and Presenting*, *Analyzing and Interpreting* [80].

Neben all den Vorteilen und Veränderungen neuer Arbeitsweisen, die aufgrund der Digitalisierung unweigerlich Einzug erhalten, sei kritisch auf einige Konsequenzen hingewiesen. Die Beschleunigung des Arbeitslebens erfordert eine erfolgreiche Stressbewältigung. Häufige Kontextwechsel gehen zu Kosten der Konzentration und gefährden die Gesamtarbeitseffizienz. Die Always-on-Mentalität, die auch in das Arbeitsleben Einzug gehalten hat, erfordert ein gutes individuelles Zeitmanagement sowie die Rücksichtnahme auf Kolleg:innen, indem die Möglichkeiten der universellen Erreichbarkeit mit Bedacht eingeschränkt werden. Grundsätzlich ist auch der Einsatz digitaler Technologien als Arbeitsmittel reflektiert auszuwählen, wie z.B. die Widerlegung des Mythos des papierlosen Büros von Sellen und Harper einprägsam aufzeigt [81].

Führungskultur

Komplementär zu den genannten Schlussfolgerungen wird auf drei neue Rollen für Führungskräfte im Kontext dieses Kulturwandels nach Hamel hingewiesen [82], deren Aufgaben i.A.a. Ebert wie folgt interpretiert werden [83]:

- **Social Architect:** Kontextgebundenes Verknüpfen relevanter Wissensträger:innen und betroffener Stakeholder im Innovationsprozess
- **Constitution Writers:** Entwicklung und Vorgabe von Leitlinien als Orientierungshilfe für Mitarbeitende und Teams in den neu gestalteten Arbeitsräumen
- **Entrepreneur of meaning:** Sinn- und werteorientiertes Führen im Kontext kultureller und ökonomischer Nachhaltigkeit durch das funktionale Arrangieren disparater Konzepte und Wahrnehmungen

Das aktuelle Kapitel systematisiert und konkretisiert Unterasspekte des vielschichtigen Begriffs der Unternehmenskultur. Handlungsbedarf besteht in einer systematischen Herangehensweise den kulturellen Wandel in Unternehmen herbeizuführen. Hierbei verlieren Ziele und Strategien an Bedeutung. Vielmehr ist es die Entwicklungsrichtung, die auf lange Sicht erfolgsbestimmend ist [84]. Die in dieser Arbeit vorgestellte DMAICS-Methodik zielt auf eine Förderung der genannten Merkmale der Innovations-, Entscheidungs- und Arbeitskultur ab, welche einer effizienten Digitalisierung zuträglich sind. Dies geschieht unter anderem durch die Strukturierung der Teilaktivitäten, welche Mitarbeitenden und agilen Teams zu autarkem Handeln und Selbstmanagement befähigt. Weiterhin werden an zentralen Entscheidungspunkten Mehrpersonenentscheidungsprozesse systematisch angeleitet. Als Erweiterung des Wissensmanagements wird die Erfassung der Kausalketten der Digitalisierung für das Erzielen einer kollektiven Lernerfahrung des Unternehmens als notwendig erachtet.

2.1.6 Eruierung des Komplexitätsbegriffs

In der Systemtheorie werden komplexe Systeme durch eine *hohe Anzahl* an Elementen, die *Beziehungen* zwischen diesen Elementen sowie der *Funktionalität* und *Intransparenz dieser Beziehungen* charakterisiert [85, 86]. Innerhalb komplexer Systeme agieren Teilsysteme autonom auf Basis dezentraler Entscheidungsmuster. Infolgedessen kann das Systemverhalten einen dynamischen bzw. emergenten Charakter aufweisen [87]. In Bezug auf produzierende Unternehmen, lassen sich *externe* und *interne Komplexitätstreiber* unterscheiden. Zu externen Komplexitätstreibern zählen volatile Märkte, Lieferengpässe, veränderliche Kundenbedürfnisse, die Arbeitsmarktsituation und die rasche Entwicklung neuer Technologien [88]. Die interne Komplexität wird durch das für die Erzeugung des *Produktportfolios* notwendige *Fertigungsnetzwerk* gekennzeichnet, welches sich durch die Aufbau- und Ablauforganisation und zugehörige Produktions- und IT-Systemlandschaft charakterisiert [89]. Die Komplexität von Organisationen steigt mit ihrer funktionalen Differenzierung, für welche Peters und Waterman folgendes Dilemma identifizieren:

„Einerseits führt Größe zu begründeter Komplexität, und eine Reaktion mit komplexen Systemen oder Strukturen ist durchaus angemessen; andererseits hängt die Funktionsfähigkeit einer Organisation ganz entscheidend von einer Voraussetzung ab – dass für Zehntausende oder Hunderttausende, die in diesem Gefüge etwas bewirken sollen, das Gefüge verständlich ist. Und das bedeutet, dass es einfach bleiben muss.“ [90]

Das vom Komplexitätsmanagement anzustrebende Optimum kann somit als das Erreichen der notwendigen Komplexität bei maximaler Einfachheit definiert werden. Maßnahmen des Komplexitätsmanagements lassen sich in die drei Kategorien *Komplexitätsvermeidung*, *-reduktion* und *-beherrschung* einteilen. Die Methoden und Werkzeuge des Komplexitätsmanagements umfassen Bestandteile der folgenden Kategorien [91, 92]:

- **Modelle:** Abstraktionen des Betrachtungsgegenstandes, z.B. als Grundlage für Metaentscheidungen durch systematische Strukturierung des Lösungsraumes
- **Programme:** Definitionen hinreichend geregelter Abläufe, z.B. Geschäftsprozesse eines ERP-Systems
- **Instrumente:** Sammelbegriff für (Informations-)Werkzeuge, zur Befähigung der Beherrschbarkeit von Komplexität, z.B. Kennzahlen als Indikatoren
- **Quasi-Objekte:** Ausbildung von strukturierenden, ordnenden Rekonstruktionen oder Repräsentationen mit stabilisierender Wirkung [92], z.B. Projekte, Stellen, Datentabellen, Qualitätsstandards
- **Simulation:** Durchspielen verschiedener Entwicklungen z.B. mittels Szenariotechnik oder softwaregestützter Simulation

Mit Blick auf die Gesamtkomplexität des Unternehmens kann die Digitalisierung sowohl als Komplexitätstreiber als auch Werkzeug der Komplexitätsbeherrschung angesehen werden. Als Komplexitätstreiber fungiert die Digitalisierung durch die Einbringung neuer Technologiestacks, das Entstehen von Abhängigkeiten zwischen Systemen und Infrastrukturen und das Erfordernis weiterer Spezialisierung zur Technologiebeherrschung. Die Digitalisierung erweist sich durch die verbesserte Informationserfassung und -verarbeitung, die Automatisierung von Prozessschritten und Mittel für Transparenz als unabdingbares Werkzeug zur Komplexitätsbeherrschung. Lediglich in Ausnahmen, wie etwa der Methoden des maschinellen Lernens und der Simulationen, fungiert die Digitalisierung auch als Mittel zur Komplexitätsreduktion oder -vermeidung. Die Komplexitätsbilanz von verbesserter Komplexitätsbeherrschung gegenüber dem Anstieg an sozialer und technischer Komplexität ist bei der Entwicklung und Einführung neuer digitaler Lösungen zu berücksichtigen. Ziel der in dieser Arbeit thematisierten DMAICS-Methodik ist den Digitalisierungsprozess in seiner Gesamtheit aus strategischer und operativer Perspektive für die Belegschaft produzierender Unternehmen in seiner Komplexität beherrschbar. Dazu werden konkret Modelle und Quasi-Objekte zur Abstraktion, Methoden und Werkzeuge zur Komplexitätsbewältigung eingesetzt und in ein Informationssystem zur Unterstützung des Digitalisierungsprozesses integriert.

2.2 Produktionssystematische Grundlagen

Der Ansatz dieser Arbeit folgt einer systemischen Auffassung von produzierenden Unternehmen. Hierzu ist ein einheitliches Verständnis der grundlegenden Systembestandteile, deren Beziehungen und deren Grenzen notwendig. Unternehmen sind wirtschaftlich-finanzielle und rechtliche Einheiten, die von Anspruchsgruppen, sog. *Stakeholdern*, gebildet, betrieben und beeinflusst werden. Eine Systematisierung des Stakeholderbegriffs wird in Kapitel 2.2.1 dargelegt. Die Motivation eines Unternehmensbetriebs stellt die gemeinsame Erreichung bestimmter *Unternehmensziele* dar. Eine Definition des Zielbegriffs, die theoretischen Grundlagen der Zielformulierung, -strukturbildung und -kontrolle befinden sich in Kapitel 2.2.2 und werden bezugnehmend auf deren praktische Anwendung diskutiert. Um Unternehmensziele im Kontext externer Umgebungseinflüsse sowie dynamischer Herausforderungen auch im Rahmen langfristiger Planungshorizonte erreichen zu können, werden sog. *Unternehmensstrategien* eingesetzt (Kapitel 2.2.3). Die unternehmensinterne Organisationsstruktur wird durch die *Aufbau-* und die *Ablauforganisation* vorgegeben. Hierzu werden in Kapitel 2.2.4 verschiedene Organisationsformen erläutert und im Kontext der Digitalisierung reflektiert. Die Produktion stellt das Zentrum der Wertschöpfung in produzierenden Unternehmen dar. Hierbei kommt es im engeren Sinne zum Aufeinandertreffen zweier zentraler Wertschöpfungsprozesse: dem Produktionsentstehungsprozess sowie dem Auftragsabwicklungsprozess. Der Produktionsentstehungsprozess wird im Forschungsfeld der *Fabrikplanung* systematisiert. Das Pendant des *Fabrikbetriebs* ist die Produktionsplanung und -steuerung. Ein Überblick über existierende Vorgehensweisen und -konzepte beider Forschungsfelder wird in Kapitel 2.2.5 gegeben. Da der evolutionäre und iterative Veränderungsprozess der Digitalisierung im Produktionsumfeld Projektcharakter aufweist, wird in Kapitel 2.2.6 ein Überblick bestehender *Projektmanagementansätze* gegeben.

2.2.1 Stakeholder

Die heutzutage gebräuchliche Definition des Anglizismus *Stakeholder* wurde durch das Stanford Research Institute erstmals wie folgt wiedergegeben: „groups without whose support the organization would cease to exist.“ [93]. Freeman erweitert den Stakeholderbegriff als „any group or individual who is affected by or can affect the achievement of an organization’s objectives“ [93]. Aus der Unternehmensperspektive lassen sich interne sowie externe Stakeholdergruppen unterscheiden (vgl. Bild 9).

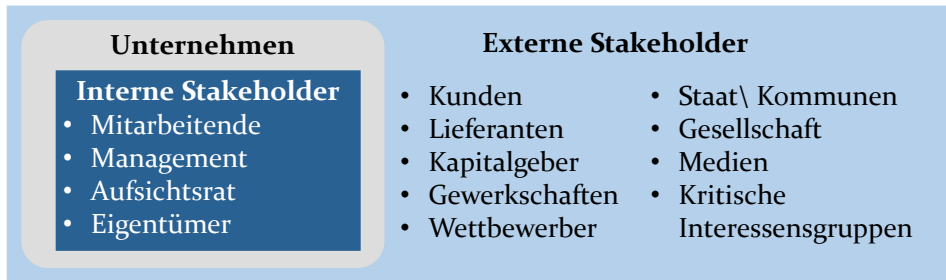


Bild 9: Stakeholder eines Unternehmens i.A.a. die Begriffsdefinition nach [93]

Neben der in Bild 9 dargestellten Unterscheidung interner und externer Stakeholder differenziert Freeman zwischen existenznotwendigen sowie nicht existenznotwendigen Stakeholdern [93]. Clarkson bezeichnet diese Kategorien als *primäre* bzw. *sekundäre Stakeholder*. Primäre Stakeholder charakterisieren sich durch marktliche Beziehungen mit dem Unternehmen. Dazu zählen *Mitarbeitende, Management, Eigentümer, Kunden, Lieferanten, Kapitalgeber* und *Gesellschaft*. Sekundäre Stakeholder stehen mit dem Unternehmen im wechselseitigen Einfluss, jedoch ohne marktliche Beziehungen, wie *Wettbewerber, Medien, Gewerkschaften, Staat* sowie *kritische Anspruchsgruppen* [94]. Zur Priorisierung von Stakeholdern identifizieren Mitchell et al. die drei Attribute *Macht, Legitimation* und *Dringlichkeit* [95]. Aufbauend auf Freemans Arbeiten entstanden eine Vielzahl an stakeholderzentrierten Ansätzen und Rahmenwerken, die sowohl normative und deskriptive Werkzeuge für das strategische Unternehmensmanagement darstellen, als auch das gemeinsame Ziel verfolgen, den Betrieb und die Struktur des Unternehmens auf die Bedürfnisse verschiedener Stakeholdergruppen ergebnisoptimal auszurichten [96].

Neben dem strategischen Unternehmensmanagement findet der Stakeholderbegriff ebenso im Projektmanagement und in der System- bzw. Produktentwicklung Verwendung. Im Projektmanagementkontext bezeichnet DIN 69901 alle *Projektbeteiligten* als Stakeholder und definiert diese als „Gesamtheit aller Projektteilnehmer, -betroffenen und -interessierten, deren Interessen durch den Verlauf oder das Ergebnis des Projekts direkt oder indirekt berührt sind“ [97]. Als Beispiele werden angeführt: „*Auftraggeber, Auftragnehmer, Projektleiter, Projektmitarbeiter, Nutzer* des Projektergebnisses, *Arbeitnehmervertretung, Anwohner, Naturschutzverbände, Stadtverwaltung, Banken, Politik* usw.“. Nahezu analog werden in Bezug auf die System- bzw. Produktentwicklung Stakeholder nach IEC 42010 als *Einzelpersonen, Teams* oder *Organisationen* verstanden, die bestimmte „Concerns“ (Interessen) am betrachteten System haben. Dazu zählen *entwickelnde, anwendende, betreibende* sowie *unterstützende Teams* bzw.

Personen [98]. Auch in diesen Betrachtungskontexten werden die Bedürfnisse verschiedener Stakeholder analysiert. Hierfür stellt die *Stakeholdermatrix* ein etabliertes Werkzeug dar, welches Stakeholder in einer Portfoliobetrachtung nach *Einfluss* und *Interesse* unterscheidet [99]. Nach einer adäquaten und vollständigen Berücksichtigung aller Stakeholdergruppen im jeweiligen Themen- bzw. Entscheidungskontext folgt als zentrales Ziel das Ableiten von Handlungsempfehlungen [100].

Rowley kritisiert an bestehenden Stakeholderframeworks, dass diese lediglich die Abhängigkeiten zwischen der als zentral erachteten Organisation und deren Stakeholdern betrachten und dabei Abhängigkeiten zwischen den Stakeholdern vernachlässigen würden. Zudem untermauert er die These, dass der Einfluss von Stakeholdern auf die Organisation zunimmt, je höher die Stakeholder untereinander vernetzt sind [101]. Nach der Beobachtung des US-amerikanischen Informatikers Melvin Edward Conway sind „Organisationen, die Systeme entwerfen [...] gezwungen, Entwürfe zu erstellen, die die Kommunikationsstrukturen dieser Organisation abbilden.“ [102]. Im Umkehrschluss hat sich die im Rahmen der Digitalisierung stattfindende vertikale und horizontale Vernetzung von Unternehmen auch in den Kommunikationsstrukturen widerzuspiegeln. Weiterhin hat der Anstieg der Gesamtkomplexität von Unternehmen durch die Einbringung digitaler Systeme einen gesteigerten Bedarf an der Vermittlung von Fachwissen zur Folge. Der aus diesen Aspekten resultierende Bedarf an der Verdichtung von Stakeholder-Netzwerken wird bedient durch das stetig wachsende Angebot an unternehmensinternen, als auch -externen Kommunikations- und Vernetzungsmöglichkeiten. Damit lässt sich die These aufstellen, dass die ubiquitäre Vernetzung von Stakeholdern in und um Unternehmen durch die Digitalisierung zunehmen wird. Um Lieferziele erfüllen zu können, streben produzierende Unternehmen jedoch nach deterministischen bzw. sprich lenkbaren Systemstrukturen. Das Abhandensein starker Stakeholdernetzwerke würde nicht den Anforderungen der Digitalisierung an die erforderlichen Kommunikations- und Wissensstrukturen genügen. Ebenso würden schwache Führungsstrukturen nicht dem notwendigen Determinismus für technisch anspruchsvollen Produktionssystemen entsprechen. Unter der Voraussetzung starker Stakeholdernetzwerke und starker Führungsstruktur, führt die Anwendung des Stakeholderframework von Rowley zu der Erkenntnis, dass das Organisationsverhalten in zunehmendem Maße von *Kompromissbereitschaft* geprägt sein wird. Der Einbezug verschiedener Stakeholdergruppen sowie Kompetenzen der Konsensfindung sind für die Digitalisierung in produzierenden Unternehmen damit essenziell.

2.2.2 Unternehmensziele

Im aktuellen Unterkapitel wird zunächst der Zielbegriff im Unternehmenskontext systematisiert. Anschließend werden relevante Grundlagen für die Zielformulierung sowie die Ableitung von Zielstrukturen erläutert. Abschließend wird die kennzahlbasierte Kontrolle der Zielerreichung kritisch diskutiert.

Systematisierung des Zielbegriffs im Unternehmenskontext

Unternehmensziele setzen sich aus den vier Informationsmerkmalen *Zielinhalt*, *Zielausmaß*, *Zeitbezug* und *Zielträger* zusammen, wodurch der gewünschte zukünftige Zustand eines Unternehmens beschrieben wird [103]. Der Zielinhalt teilt sich im engeren Sinne in zwei Kategorien *Formalziele* und *Sachziele* auf. Im weiteren Sinne stellen *kulturelle*, *technische*, *ökologische* und *gesellschaftliche Ziele* weitere Kategorien dar, die sich teilweise mit den Sachzielen überschneiden [104].

Formalziele äußern sich als ökonomische Zielgrößen und lassen sich empirisch mittels wirtschaftlicher Kennzahlen ausdrücken [105]:

- **Erfolgskennzahlen**, z.B. Umsatz, Gewinn vor Steuern, EBIT
- **Liquiditätskennzahlen**, z.B. Liquiditätsgrad, Umlaufvermögen
- **Rentabilitätskennzahlen**, z.B. Umsatzrendite, Return on Investment
- **Weitere Kategorien**: Kapitalstrukturkennzahlen, Schuldenkennzahlen, Umschlagshäufigkeitskennzahlen

Sachziele beziehen sich auf Leistungsmerkmale des Handels und werden durch Angaben der *Art*, *Menge*, *Ort*, *Qualität* und *Zeit* ausgedrückt [104]. Sachziele sind stets kontextbezogen zu interpretieren. Beispiele sind:

- **Art**, z.B. Fertigungsverfahren, Automatisierungsgrad, ökologischer Fußabdruck
- **Menge**, z.B. Anzahl zu produzierender Teile
- **Ort**, z.B.: Flächenbedarf
- **Qualität**, z.B. Fehlerraten, Qualitätsrate
- **Zeit**, z.B. Prozesszykluszeit, Umrüstzeit

Kriterien der Zielformulierung

Die auf Peter Drucker zurückgeführten SMART-Kriterien können als De-Facto-Standard für eine vollständige Zielformulierung angesehen werden. SMART steht hierbei für das Akronym aus den Kriterien *Specific*, *Measurable*, *Achievable*, *Reasonable* und *Time-bound* [106].

Den Benchmark bzgl. Vollständigkeit bilden die i.A.a. John Whitmore als SMART-PURE-CLEAR abgekürzten Kriterien, die neben den SMART-Kriterien weitere Kriterien der Zielsetzungstheorie umfassen. Dabei steht das Akronym PURE für *Positively Stated, Understood, Respect others* und *Ethical* und das Akronym CLEAR für *Challenging, Legal, Environmentally sound, Agreed und Recorded* [107].

Je nach Art des Ziels kann es vorkommen, dass bei einigen Anwendungsfällen nicht alle Kriterien erforderlich oder zutreffend sind. Grundsätzlich sind die genannten Akronyme als eine geeignete und etablierte Gedankensstütze zur Vollständigkeits- und Qualitätsprüfung bei der Zielformulierung einzuordnen.

Ableitung von Zielstrukturen

Zur Erstellung aufeinander abgestimmter Zielstrukturen, werden operative Unterziele von strategischen Oberzielen abgeleitet. Wie Bild 10 illustriert, lässt sich die Rangordnung sowie die gegenseitige Einflussnahme in Form einer kaskadenförmigen Zielhierarchie abbilden.

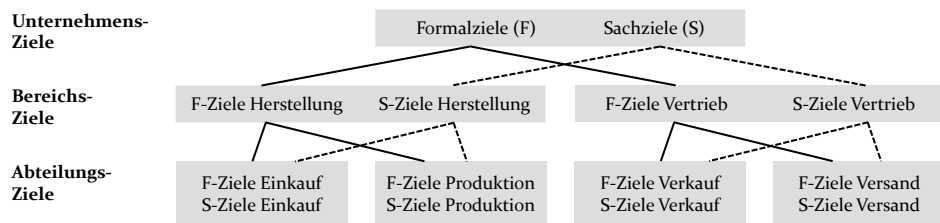


Bild 10: Kaskadenförmiger Aufbau einer Zielhierarchie in Unternehmen i.A.a. [108]

Aufbauend auf dem pyramidenartigen Schema in Bild 10 stellt die dem Lean-Management zuzuordnende Hoshin-Kanri-Methode ein Vorgehen zur Zielableitung dar, deren zentrales Werkzeug die gleichnamige Hoshin-Kanri-Matrix bildet (vgl. Bild 11).

Bei der Hoshin-Kanri-Methode werden die im Rahmen der Strategieentwicklung definierten langfristigen Ziele auf Jahresziele heruntergebrochen. Diesen wiederum sind Aktivitäten zur Zielerreichung zuzuordnen. Für die spätere Wirksamkeitsprüfung werden Leistungsindikatoren, auch Kennzahlen, Key Performance Indicators (KPIs) oder Key Control Indicators (KCI) genannt, definiert. Zusätzlich werden den Aktivitäten Verantwortliche zugewiesen. Die Anwendung der Hoshin-Kanri-Matrix lässt sich durch Kaskadierung auf mehreren Hierarchieebenen des Unternehmens einsetzen. So kann z.B. ein Bereich oder eine Abteilung ihnen zugeordnete Einzelaktivitäten in einer separaten Hoshin-Kanri-Matrix beplanen, indem

stufen, eine Wachstums- und eine Strukturanalyse aufweist [111]. Steuerungs-Kennzahlssysteme bestehen dagegen aus sachlich zusammenhängenden Kennzahlen, die der Erreichung von Zielstellungen dienen, indem sie im Rahmen von Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben eingesetzt werden. Zu einem der bekanntesten Vertretern dieser Systeme gehört die Balanced Scorecard. Bei der ursprünglichen Balanced Scorecard nach Kaplan und Norton werden die Perspektiven der Finanz-, Kunden-, Lern- sowie der internen Prozesssicht eingenommen [112]. Die Vision der vollständig kennzahlbasierten Erfassung und Optimierung aller Vorgänge eines Unternehmens scheitert jedoch an der entstehenden Gesamtkomplexität und ist somit als eine Utopie anzusehen [113]. Der Einsatz von Kennzahlen ist folglich insbesondere auch in Hinblick auf ein wirtschaftliches Aufwand-Nutzen-Verhältnis auszubalancieren.

Im Kontext dieses Kapitels ist Digitalisierung als ein zentrales Mittel zur Erreichung von Unternehmenszielen einzuordnen. Eine Kaskadierung und Zuordnung von Digitalisierungsmaßnahmen ist via der in Bild 11 gezeigten Hoshin-Kanri-Matrix möglich. Für eine effiziente Digitalisierung ist jedoch weiterhin ein System zu entwickeln, welches die Summe aller Digitalisierungsmaßnahmen in einem unternehmensspezifischen Plan, einer Digitalisierungsstrategie, strukturiert und dabei etwaige Synergien und Abhängigkeiten betrachtet. Für die innerhalb der Digitalisierungsstrategie definierten Ziele sind die Kriterien zur Zielformulierung übertragbar. Da die Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen projektorientiert erfolgt (siehe Kapitel 2.2.6), sind bestehende Kennzahlssysteme der Regelorganisation nur bedingt geeignet. Für eine feingranulare Kontrolle der Zielerreichung sind Methoden des (Multi-)Projektmanagements anzuwenden. Über die zu Beginn dieses Abschnittes angesprochene Verknüpfung von Digitalisierungsmaßnahmen und Unternehmenszielen ist eine Kontrolle des Fortschritts sowie der final geleistete Beitrag der Digitalisierung zur Zielerreichung quantifizierbar. Aus Effizienzgründen bedarf es jedoch klar definierter, schlanker und durchgängiger Reportingwege von komplexen Projektumfeldern in die klassischen Kennzahlensysteme produzierender Unternehmen.

2.2.3 Unternehmensstrategie

In der Spieltheorie bezeichnet eine Strategie den vollständigen Verhaltensplan eines Spielers [114]. Im Unternehmenskontext ist diese Vollständigkeit in der Praxis nicht zu gewährleisten. Im strategischen Management wird grundlegend zwischen *geplanter* und *umgesetzter Strategie* differenziert.

Diese Unterscheidung existiert im ursprünglichen, spieltheoretischen Sinne nicht [114]. Vielmehr beschreiben Strategien im Unternehmenskontext langfristige Planungszeiträume bzw. die Entwicklungsrichtung des Unternehmens. Eine weitere Systematisierung des Strategiebegriffs ist über die drei Dimensionen *Strategieumfang*, *Bedeutungsinhalt* und *Umsetzungsart* möglich [115, 114, 116, 117].

Hinsichtlich des Strategieumfangs werden im Wesentlichen die drei Ebenen der Strategieformulierung die *Unternehmens-*, die *Geschäfts-* und die *Funktionsebene* unterschieden [115]. Folglich koexistieren in einem Unternehmen meist mehrere Strategien.

Die verschiedenen Bedeutungsinhalte des Strategiebegriffs teilt Mintzberg in die folgenden fünf Kategorien auf [116]:

- **Strategy as plan:** Umsetzungspläne mit definierten Zielen
- **Strategy as pattern:** Bildung einer Strategie basierend auf erfolgreichen Handlungs- und Verhaltensmustern der Vergangenheit
- **Strategy as position:** Positionierung des Unternehmens im Markt
- **Strategy as ploy:** Taktische Manöver zur Erzielung eines Wettbewerbsvorteils
- **Strategy as perspective:** Kollektive Denkweise der Organisation z.B. vereint auf Basis einer geteilten Vision und Mission

Umsetzungsarten reichen von *plangetriebenen Unternehmensstrategien* über *richtlinienbasierte Schirmstrategien* bis hin zu *emergenten Konsensstrategien* [117]. Im Kontext der Digitalisierung in der Produktion erscheinen Schirmstrategien, z.B. in Form von IT-Policies zur Komplexitätsbewältigung und -steuerung, als adäquates Mittel. Durch die zunehmende interne sowie externe Vernetzung von Unternehmen erhöhen sich die Interdependenzen zwischen Strategien. Zur Vermeidung von konfligierenden Strategien und zur Konfliktlösung von sich widersprechenden Strategien stellen Konsensstrategien ein geeignetes Mittel dar. Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass Strategiemuster, die einen zielgerechten Ordnungsrahmen steigender Flexibilität, Dezentralität und Agilität schaffen, zu einer erfolgreichen Digitalisierung aufgrund ihres emergenten Charakters beitragen. Umgekehrt kann die Digitalisierung durch die Positionierung des Unternehmens im Markt als Unternehmensstrategie verstanden werden, wie beispielsweise eine Analyse der vier Technologiekonzerne Apple, Amazon, Google, Facebook (heute: Meta) zeigt [118].

2.2.4 Aufbau- und Ablauforganisation

Im Folgenden werden die Grundformen der Aufbau- sowie Ablauforganisation in Unternehmen erläutert und hinsichtlich ihrer Eigenheiten diskutiert. Anschließend werden Communitynetzwerke thematisiert, die eine zu den konventionellen Organisationsformen ergänzende Form darstellen.

Grundformen der Organisationsstruktur

Der Begriff Aufbauorganisation beschreibt das hierarchische Grundgerüst eines Unternehmens, das die *Verantwortlichkeiten, Kommunikationsbeziehungen* und *Weisungsbefugnisse* zwischen organisatorischen Einheiten definiert [119]. Die drei grundlegenden Organisationstypen bilden das *Ein-, Stab- und Mehrliniensystem* [120]. Die Strukturierung von Liniensystemen kann funktions- oder objektorientiert nach Geschäftsbereich, Produkt, Kunde und Region erfolgen [121]. In Abgrenzung zu Projektorganisationen (vgl. Kapitel 2.2.6) bilden Staborganisationen beständige Organisationseinheiten, welche bereichsübergreifende Dienstleistungen zentral erbringen. Konkrete Ausprägungen eines Mehrliniensystems stellen die Matrix-, bzw. die Tensororganisation dar [122] (vgl. Bild 12).

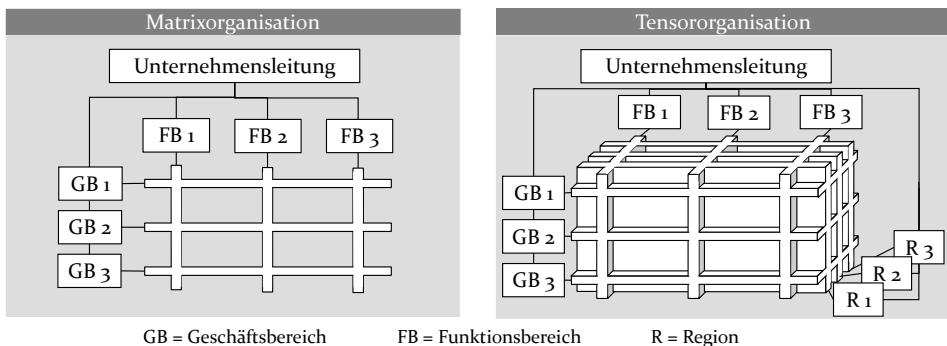


Bild 12: Sonderformen mehrdimensionaler Mehrliniensysteme

Bei der Matrixorganisation handelt es sich um eine zweidimensionale Mehrlinienorganisation, welche aus der Kombination funktionaler und objektorientierter Leitungssysteme besteht [121]. Wird die Matrixorganisation um mindestens eine zusätzliche Dimension erweitert, spricht man von einer Tensororganisation. Diese ist insbesondere bei internationalen Großkonzernen anzutreffen. Häufig stellen hierbei geographische Regionen eine weitere Dimension dar [123].

Betrachtet man die jeweiligen Vorteile von Ein- und Mehrliniensystemen, zeichnen sich Einliniensysteme insbesondere durch die Eindeutigkeit der Dienst- und Kommunikationswege aus. Ferner weisen sie sich durch ein

geringes Konfliktpotential aufgrund von Kompetenzüberschneidungen und einen geringeren Kommunikationsbedarf aus. Mehrliniensysteme hingegen ermöglichen die Synergienutzung, fördern kurze Kommunikationswege und entlasten ranghohe Instanzen mit thematischen Spezialisierungsmöglichkeiten [124].

Communities

Communities sind organisierte, soziale Netzwerke von Individuen, welche motiviert durch gemeinsame Ziele oder Interessen entstehen [125]. Im Unternehmenskontext ermöglichen Communities eine enge, bereichsübergreifende und bedarfsgetriebene Zusammenarbeit und fördern den Erfahrungsaustausch. Für die communitybasierte Optimierung des Anlagenengineering entwickelt Götz eine Ablauforganisationsform, die basierend auf einer Top-Down-Initiative die Bildung einer Bottom-Up-Community mittels eines Programms befähigt [126]. In Anlehnung an das Modell von Götz wird in Bild 13 die aufbauorganisatorische Förderung von Digitalisierungs-Communities beschrieben.

Die Bildung von emergenten Communitystrukturen außerhalb der Ablauforganisation bedarf eines gewissen Freiraums, der im Unternehmenskontext durch die Leitung gewährt wird. Der Softwarekonzern Google galt in dieser Hinsicht jahrelang als Vorreiter, indem er seinen Mitarbeitenden 20% ihrer Arbeitszeit für das Verfolgen von Projekten jenseits ihrer eigentlichen Tätigkeit einräumte [127]. Innerhalb des geplanten Freiraums agiert der Sponsoren zusammen mit leitenden Vertreter:innen der Unternehmensorganisation als ein strategisches Lenkungsgremium. Eine optimale Aussteuerung der Communities erfordert koordinierende Instanzen. Diese unterstützen die dynamische Bildung der Communities durch die Etablierung von Kommunikationsstrukturen in Form von Veranstaltungen (z.B. themenbezogene Vorträge, Workshops, Hackathons) und fördern den Erfahrungsaustausch proaktiv z.B. mittels Newslettern oder über unternehmensinterne Social-Media-Plattformen. Innerhalb der eröffneten Freiräume und gefördert durch die organisatorische Unterstützung bilden sich themenbezogene Teams bedarfs- und nutzengetrieben. Die Communitystrukturen sind dabei dynamischer Natur und durch die Autonomie der Community kontinuierlich anpassungsfähig.

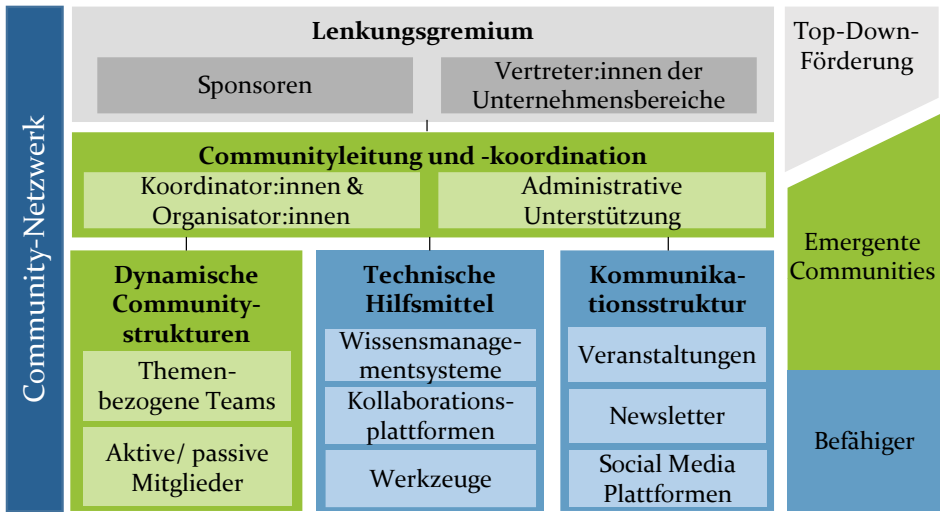


Bild 13: Befähigung und Förderung von Digitalisierungscommunities im Rahmen der Aufbauorganisation von produzierenden Unternehmen i.A.a. [126]

Ablauforganisation

Die Ablauforganisation eines Unternehmens bezeichnet dessen Prozessstruktur. Bei der Geschäftsprozessmodellierung werden hierbei nach ISO 9000 die drei Prozessarten *Kern-, Führungs- sowie Unterstützungsprozesse* unterschieden [128]. Die Darstellung in Bild 14 verdeutlicht, dass das Management sowie unterstützende Prozesse auf die Kernprozesse ausgerichtet sind.

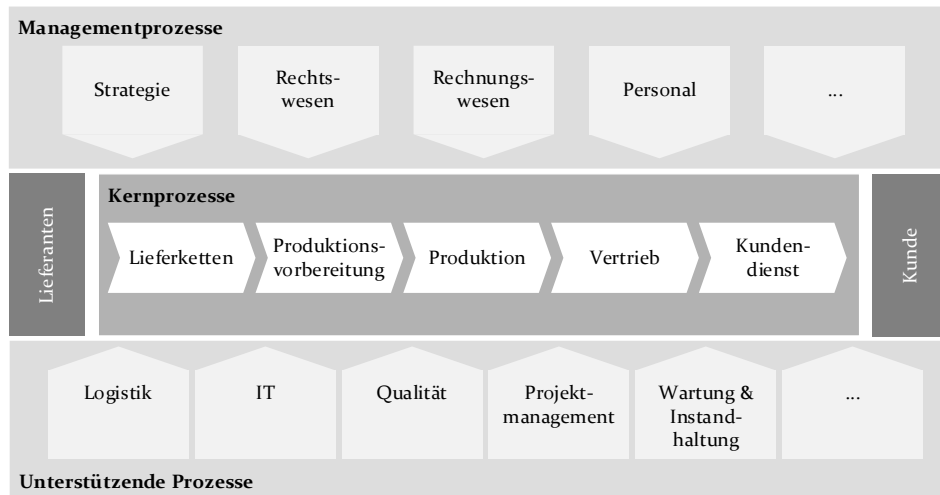


Bild 14: Exemplarische Prozessstruktur eines produzierenden Unternehmens [129]

Managementprozesse umfassen dabei lenkende, steuernde und überwachende Aufgaben. Unterstützende Prozesse reduzieren die Komplexität der Kernprozesse, indem modulare und wiederkehrende Aufgaben aus diesen herausgelöst werden. Dies ermöglicht die separate Spezialisierung und Professionalisierung dieser Aufgaben in Form von Dienstleistungen.

Ein etabliertes Konzept für die Detaillierung der in Bild 14 dargestellten abstrakten Prozessstruktur stellt das *ARIS-Modell* nach Scheer zur Abbildung und Optimierung von Geschäftsprozessen dar. Das Akronym ARIS steht für *Architektur integrierter Informationssysteme*, das ein Fünf-Sichten-Konzept aufweist. Die einzelnen Perspektiven lauten wie folgt [130]:

- **Funktionssicht:** Betriebswirtschaftliche Tätigkeiten und deren hierarchische Beziehungen
- **Organisationssicht:** Informationen der Aufbauorganisation und Organisationsstruktur weiterer Ressourcen wie z.B. Maschinen
- **Datensicht:** Datenmodelle sowie auszutauschende Informationen
- **Leistungssicht:** Materielle und immaterielle Leistungen und Erzeugnisse
- **Steuerungssicht:** Integration der vier Sichten in einen sach- und zeitlogischen Zusammenhang

Die Abläufe eines Unternehmens befinden sich im Rahmen der Prozessanalyse und -anpassung in einem ständigen Wandel. Durch Reorganisationen wird die Aufbauorganisation auf die sich dynamisch entwickelnden Unternehmensabläufe angepasst. Die Um- bzw. Neugestaltung von Geschäftsprozessen wird unter dem englischen Begriff des *Business Process Reengineerings* geführt (zu Deutsch Geschäftsprozessneugestaltung), dem nach dem Gedankengut des Lean-Managements im Wesentlichen vier Paradigmen zugrunde liegen [131, 132]:

- Fokussierung auf relevante Geschäftsprozesse
- Ausrichtung der Geschäftsprozesse auf den Kunden
- Konzentration des Unternehmens auf die Kernkompetenzen
- Ausnutzung der informationstechnischen Möglichkeiten

Letzterer Grundsatz spiegelt den Einfluss der Digitalisierung im Kontext der Prozessgestaltung wider. Durch die Automatisierung von Informationsflüssen durch den Einsatz von Software-Werkzeugen, wie z.B. Software für die Prozessorchestrierung und Kollaborationswerkzeuge, wirkt die Digitalisierung als ein maßgeblicher Beschleuniger von Unternehmensabläufen. Weiterhin eröffnen sich im Rahmen der vertikalen Integration eine Vielzahl an Potentiale zur Prozessoptimierung.

2.2.5 Fabrikplanung und -betrieb

Das aktuelle Unterkapitel dient der Systematisierung verschiedener Aufgaben der Fabrikplanung und des Fabrikbetriebs, um eine spätere Einordnung der Digitalisierung in den Gesamtthemenkomplex zu ermöglichen. In Hinblick auf den Fabriklebenszyklus bezeichnet die Fabrikplanung die dem Betrieb vorgelagerte Lebenszyklusphase. Die Planungsaufgaben des Betriebs werden im deutschen Sprachgebrauch unter der Begrifflichkeit Produktionsplanung und -steuerung subsummiert.

Fabrikplanung

Während in der Literatur eine Vielzahl an Vorgehensweisen für die Fabrikplanung existieren, konsolidiert die VDI-Richtlinie 5200 die grundlegenden Inhalte. Nach dieser Richtlinie wird die Fabrikplanung wie folgt definiert:

„Systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion.“ [133]

Es werden die vier Planungsanlässe *Neuplanung*, die *Umplanung*, der *Rückbau* sowie die *Revitalisierung* bei der Fabrikplanung unterschieden. Zur besseren Einordnung von Unteraufgaben wird der Themenkomplex der Fabrikplanung mittels eines generischen Vorgehensmodells in die sieben aufeinanderfolgende Phasen *Zielfestlegung*, *Grundlagenermittlung*, *Konzeptplanung*, *Detailplanung*, *Realisierungsvorbereitung*, *Realisierungsüberwachung* und die *Hochlaufbetreuung* gegliedert [133].

Grundlegende Fragestellungen der Planung von Produktionssystemen befassen sich mit der auf den Produktionsbetrieb ausgerichteten Zuordnung von *Produkten*, *Prozessen* und *Ressourcen* [134]. Softwarelösungen für die durchgängige Planung von Produktionssystemen begegnen diesen Fragestellungen mittels modellbasieren Ansätzen [135, 136]. Aus Produktmodellen, die die Produktstrukturen durch logische Verknüpfungen der Baugruppen und Komponenten beinhalten, lassen sich Stücklisten, sog. Bills of Material (BoM), generieren [137]. In Arbeitsplänen, sog. Bills of Process, wird die die Summe aller Prozesse definiert, welche für die Herstellung von Produkten benötigt wird [136]. Auf Basis der Arbeitspläne erfolgt die Zuordnung der für die Prozessdurchführung benötigten Fertigungsressourcen. Die Strukturierung der Elemente der drei Dimensionen Produkt, Prozess, Ressource sowie ihrer logischen Verknüpfungen bilden die Informationsbasis für die weiteren Planungsschritte des Fabrikbetriebs.

Gleichbedeutend mit der *digitalen Fabrikplanung* steht die Begrifflichkeit der *Digitalen Fabrik* als Sammelbegriff für digitale Modelle, Methoden und Werkzeuge, die durch ein gemeinsames Datenmanagement verbunden sind. Hierzu wird neben den bereits genannten digitalen Assets auch das Gebäude in Form eines *Building Information Models (BIM)* gezählt, das Informationen über die Versorgungsinfrastruktur und vorhandene Fertigungs- und Logistikflächen beinhaltet [138].

Produktionsplanung und -steuerung

Ein ganzheitliches Konzept zur Produktionsplanung stellt das auf dem *Material Requirements Planning (MRP I)* aufbauende *Manufacturing Resource Planning (MRP II)* dar (vgl. Bild 15). Bei dieser Methode erfolgt die Fertigungssteuerung ausgehend von der Produktionsprogrammplanung über die Materialbedarfsplanung und die Kapazitätsbedarfsplanung. Aufeinanderfolgende MRP II-Planungsaufgaben stehen in Rückkopplung zueinander, sodass z.B. eine Materialbedarfsplanung korrigiert werden kann, sofern absehbar ist, dass die vorhandenen, planbaren Kapazitäten diese nicht termingerecht bewältigen können. Weiterhin wird bei MRP II eine durchgängige Planung bis hin zur Geschäftsplanung angestrebt. Gegenstand der Grobplanungsaufgaben sind längerfristige Entscheidungen bzgl. Personal und Investitionen. Die Anbindung der Feinplanung an die Grobplanung ist mehr als ein paradigmatischer Schritt anzusehen, weniger als ein planungstechnischer [139]. Die Feinplanung nach MRP II befähigt gewissermaßen datengetriebene Entscheidungen des übergeordneten Managements [140].

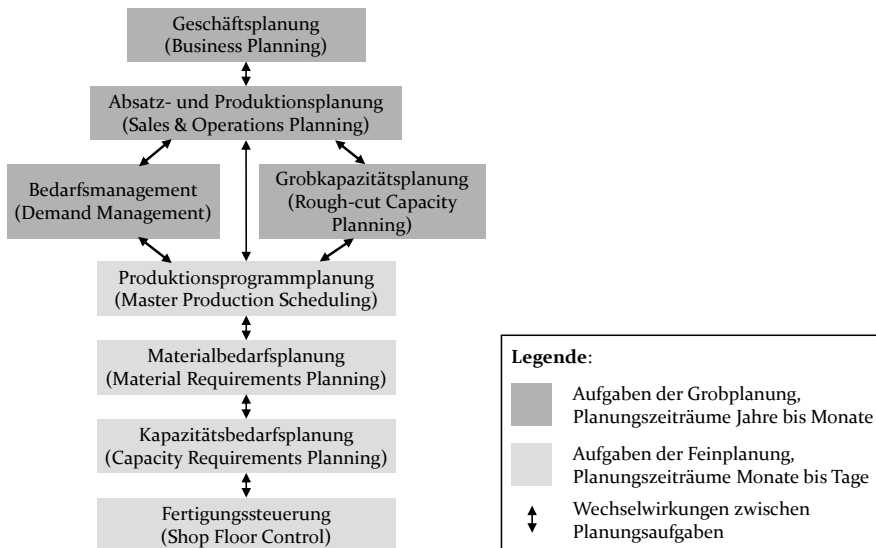
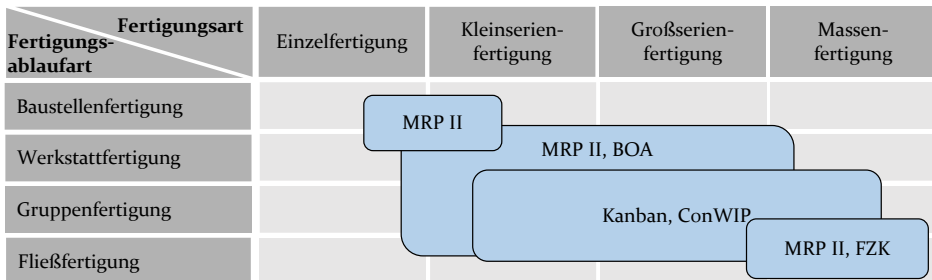


Bild 15: Planungs- und Steuerungslogik der MRP II-Methode i.A.a. [140]

Neben der Steuerungslogik auf der Basis von MRP II existieren weitere Steuerungsverfahren, die von Piontek nach Einsatzbereichen in Bild 16 systematisiert werden.



Abkürzungen: Manufacturing Resource Planning (MRP II), Belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA), Constant Work in Process (ConWIP), Fortschrittzahlenkonzept (FZK)

Bild 16: Einsatzbereich von Steuerungsverfahren [141]

Die in Bild 16 gelisteten Steuerungsverfahren können zudem nach dem zugrundeliegenden Prinzip (Push bzw. Pull) der Materialbereitstellung gegliedert werden. Zum Verfahren des Push-Prinzips ist neben dem bereits vorgestellten MRP II-Konzept die belastungsorientierte Auftragsfreigabe zu zählen (BOA), die termin- und belastungsgerechte Materialeinsteuerung anstrebt. Zu den Verfahren nach dem Pull-Prinzip zählen Kanban, Constant Work in Process (ConWIP) sowie das Fortschrittzahlenkonzept. Die Steuerungsverfahren zielen insgesamt auf eine Bestands- und Durchlaufzeitreduzierung ab [142]. Die Logik und Eignung der genannten Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme bleiben im Kontext der Digitalisierung grundsätzlich bestehen. Jedoch bietet die Digitalisierung die Chance die Durchgängigkeit des Informationsflusses sowie neuer Analysemöglichkeiten zu verbessern und damit die Produktionsplanung und -steuerung in den Aspekten Qualität und Zeit zu optimieren. Beispielsweise durch den Einsatz vernetzter Informationssysteme, der KI- und simulationsbasierter Planung oder dem Einsatz von CPPS bzw. IOT-Systemen [143].

2.2.6 Projektmanagement

Digitalisierungsmaßnahmen deren Umfang nicht von der Regelorganisation innerhalb der gegebenen Aufbauorganisation getragen werden kann, werden in dedizierten Projekten realisiert. Die ganzheitliche Betrachtung von Projekten ist Aufgabe des Projektmanagements. Im aktuellen Unterkapitel werden zunächst Definitionen grundlegender Begriffe aus diesem Bereich erläutert. Weiterhin wird ein Überblick über bestehende theoretische

Projektmanagementansätze gegeben. Anschließend werden organisatorische Projektkonstellationen systematisch betrachtet.

Begriffsklärungen

DIN 69901 definiert den Begriff *Projekt* als ein „Vorhaben, das im Wesentlichen durch die Einmaligkeit, aber auch Konstante der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist“. Dazu werden Zielvorgaben, zeitliche, finanzielle, personelle und andere Begrenzungen, eine Abgrenzung gegenüber anderen Vorhaben sowie eine projektspezifische Organisation als Beispiele angeführt. Weiterhin definiert die Norm das *Projektmanagement* als die „Gesamtheit von Führungsaufgaben, -organisation, -techniken und -mitteln für die Initiierung, Definition, Planung, Steuerung und den Abschluss von Projekten“. Das *Multiprojektmanagement* bildet den „organisatorische[n] und prozessuale[n] Rahmen für das Management mehrerer einzelner Projekte“ [144]. Eine Menge zusammenhängender Projekte wird als *Programm* bezeichnet. Ein *Projektportfolio* umfasst die Menge aller geplanten, genehmigten und laufenden Projekte und Programme eines Unternehmens bzw. der Trägerorganisation [145].

Vorgehensmodelle und -ansätze des Projektmanagements

Vorgehensmodelle dienen im Projektmanagement der Strukturierung der Vorgehensweisen bei der Abwicklung von Projekten mit wiederkehrendem Charakter. Zu den bekanntesten Vertretern für das generische Projektmanagement gehören die Modelle der *DIN-Norm 69901-2*, der Leitfaden des *Project Management Body of Knowledge (PMBOK-Guide)* sowie die *Prince2* Projektmanagementmethode. Das Vorgehensmodelle des *M-Modells* nach Ahlemann kann in diesem Kontext kleinster gemeinsamer Nenner aufgefasst werden [146] (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Vergleich etablierter Vorgehensmodelle des Projektmanagements [146–149]

M-Modell (Phasen)	DIN 69901-2 (Prozesse)	PMBok (Prozessgruppen)	Prince2 (Phasen)
1. Initiierung	1. Initialisierung	1. Initiierung	1. Vor dem Projekt 2. Initialisierung
2. Vorbereitung	2. Definition 3. Planung	2. Planung	... Weitere Phasen
3. Durchführung	4. Steuerung	3. Ausführung 4. Überwachung & Steuerung	
4. Abschluss	5. Abschluss	5. Abschluss	n. Letzte Phase

Der Vergleich in Tabelle 1 zeigt die Ähnlichkeit der Ansätze in Bezug auf deren Vorgehensmodelle. Weiterhin weisen alle Projekte in ihrer Grundstruktur einen linearen, sprich wasserfallartigen Charakter auf. Innerhalb der nahezu identischen Vorgehensmodelle unterscheiden sich die Ansätze anhand ihrer inhaltlichen Detaillierung. Das *M-Modell* bildet eine Referenzarchitektur für die Planung, Kontrolle und Koordination von Projekten und betrachtet die in Tabelle 1 gelisteten Phasen aus einer strategischen, taktischen und operativen Managementsicht [146]. Das Modell dient der Schaffung eines holistischen Überblicks der Wirkzusammenhänge auf einem hohen Abstraktionsniveau und reicht in seiner methodischen Detaillierung weniger weit als die folgenden Projektmanagementansätze. *DIN 69901-2* umfasst Grundlagen, Prozesse, Prozessmodelle, Methoden, Daten, Datenmodell und normiert die Terminologie des Projektmanagements für den deutschen Sprachgebrauch [147]. Der *PMBok-Guide* stellt einen Projektmanagementstandard dar, der Prozessgruppen, analog zu den in Tabelle 1 gelisteten Vorgehensmodellphasen, sowie zehn sog. Wissensgebiete des generischen Projektmanagements definiert [148]. *Prince2* ist eine prozessbasierte und skalierbare Vorgehensweise für das Projektmanagement, die sich aus jeweils sieben Prinzipien, Themen und Prozessen zusammensetzt. Prinzipien bezeichnen hierbei die grundlegenden Werte und Regeln, ähnlich einer generischen Projektgovernance. Themen beschreiben die Umsetzung der Prinzipien. Die sieben Prozesse bilden den Prozessfortschritt ab und gliedern sich in das zugehörige Prince2-Phasenmodell ein [149].

Projektorganisation

Unter dem Begriff Projektorganisation werden projektspezifische, hierarchische Anordnungen von Mitarbeitenden bezeichnet [71]. Der zu organisierende Personenkreis sowie die aus Sicht des auftraggebenden Unternehmens zu definierenden Rollen ergeben sich in Abhängigkeit von der Projektkonstellation. Bild 17 visualisiert hierzu drei Varianten.

Der Auftraggebende, meist gleichbedeutend mit dem Kunden, erteilt einen Projektauftrag an einen realisierungsverantwortlichen Projekteigner. Dieser steht in Abstimmung mit dem Lenkungsgremium und sofern vorhanden einem Multiprojektmanagement. Weitere Stakeholder stellen die Projektleitung und das Projektteam dar. Bei internen Projektkonstellationen (Variante 1) besitzt das auftraggebende Unternehmen die Möglichkeit der vollständigen Einflussnahme auf alle Personen der Projektorganisation. Bei Variante 2 werden einige Teilprojekte an externe Projektteams ausgelagert. Die Schnittstelle der Zusammenarbeit kann hierbei ein weiterer externer

Projekteigner darstellen. Bei der rein externen Variante unterstehen die Personen der Projektorganisation nicht dem auftraggebenden Unternehmen, sondern einer externen Partei. Die Mitwirkung am Projekt erfolgt allein durch den Projektauftrag [150].

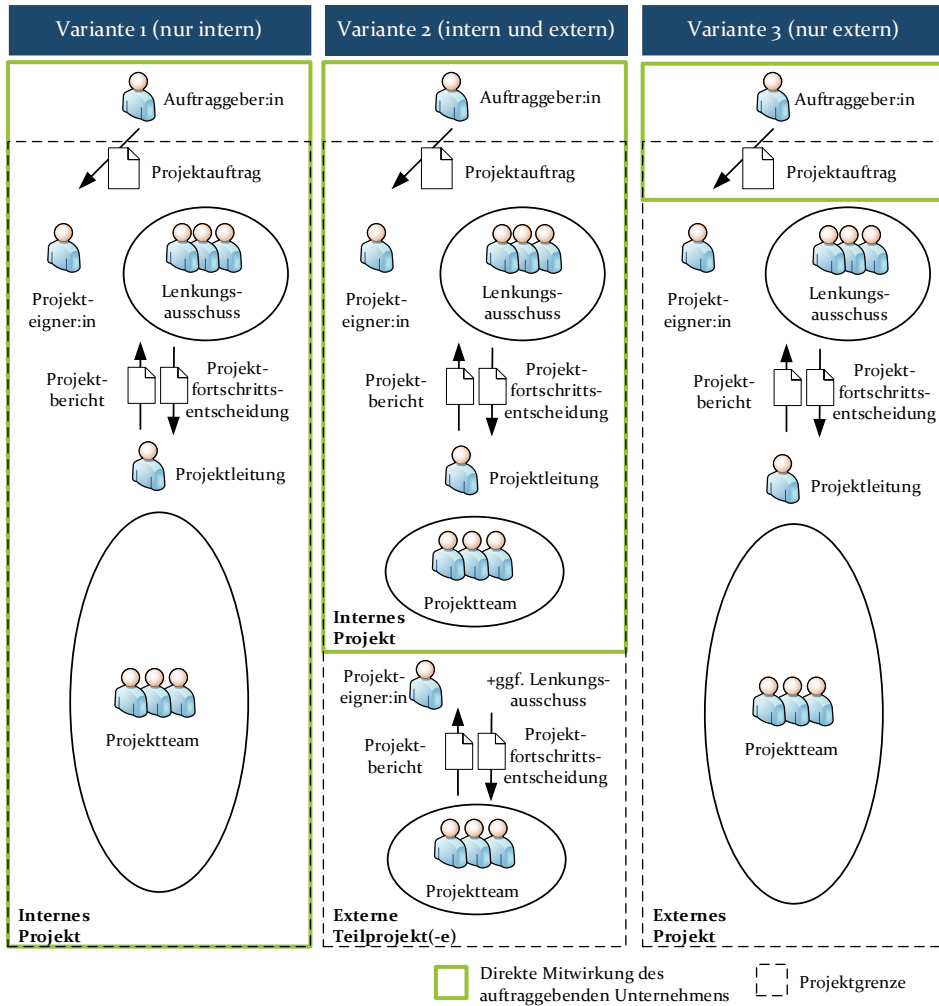


Bild 17: Varianten organisatorischer Projektstellungen i.A.a. [150]

Für die Integration von Projektorganisation in die primäre Ablauforganisation produzierender Unternehmen können vier Arten unterschieden werden [71]:

- **Reine Projektorganisation:** Alle projektbeteiligten Mitarbeitenden werden einer Projektleitung zugeordnet
- **Einfluss-Projektorganisation:** Projektkoordinatoren, die als Stabsfunktion in die Aufbauorganisation integriert sind, lenken und koordinieren Projekte der Linien
- **Matrix-Projektorganisation:** Projektleiter tragen die Gesamtverantwortung über die Projekte, jedoch unterstehen Projektmitarbeitende weiterhin der Weisungsbefugnis ihrer Linienfunktion
- **Projektmanagement in der Linie:** Projekte werden innerhalb der bestehenden Linienfunktionen abgewickelt

2.3 Kritische Würdigung des Stands der Forschung und Handlungsbedarf

Zur systematischen Bestimmung des forschungsseitigen Handlungsbedarfs wurde eine Literaturrecherche bzgl. des Stands der Forschung im Forschungsfeld Digitalisierung durchgeführt. Im Rahmen der Recherche wurden insgesamt 51 Publikationen von Forschungseinrichtungen, Forschungsprojekten und Förderträgern, welche Vorgehensweisen zur Digitalisierung beschreiben, ausgewählt. Diese wurden anschließend in einem kriterienbasierten Bewertungsverfahren nach Wetterney anhand eines *Objekt-, Prädikat- und Zielbereichs* in einem qualitativen Punktwertverfahren genauer bewertet [151]. Bild 18 veranschaulicht das verwendete Vorgehen.

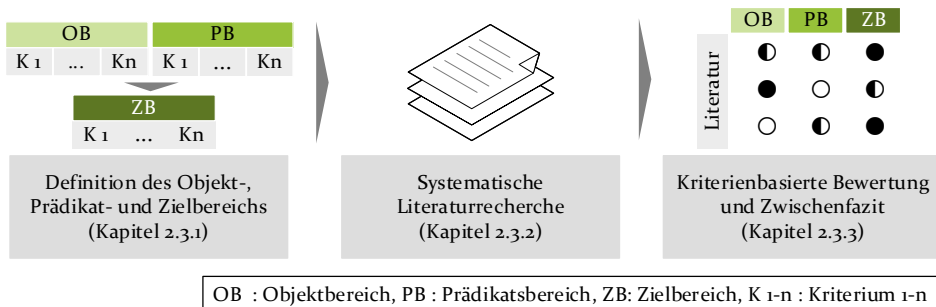


Bild 18: Vorgehen bei der inhaltlichen Bewertung des Stands der Forschung

In Kapitel 2.3.1 erfolgt eine Erläuterung der Bewertungskriterien des Objekt-, Prädikat- und Zielbereichs. In Kapitel 2.3.2 werden insgesamt zehn Ansätze vorgestellt, welche am relevantesten nach dem angewandten

Punktwertverfahren gelten. Eine Übersicht und Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse werden in Kapitel 2.3.3 gegeben. Ausgehend von dieser Gegenüberstellung wird der vorliegende Handlungsbedarf in einem Zwischenfazit in Kapitel 2.3.4 abgeleitet.

2.3.1 Definition des Objekt-, Prädikat- und Zielbereichs zur Bewertung bestehender Ansätze

Der *Objektbereich* definiert den Analysefokus und trägt im Kontext dieser Arbeit den Titel „Digitalisierung in der Produktion“. Zugehörige Unteraspekte leiten sich aus den im Grundlagenteil thematisierten Inhalten ab (vgl. Kapitel 2.2 und 2.1). Der *Prädikatbereich* fokussiert die Mittel des Gestaltungsbereichs in Form einer „Betrachtung von Prozessen, Aktivitäten und eingesetzten Hilfsmitteln zur Zielerreichung“ [151] und setzt sich in dieser Arbeit aus systematischen und methodischen Bestandteilen zusammen (vgl. Kapitel 3.1). Als *Zielbereich* wird eine „effektive sowie effiziente Digitalisierung“ definiert. Bild 19 stellt den logischen Bezug zwischen den Bereichen her und veranschaulicht deren Kriterien in einer Übersicht.

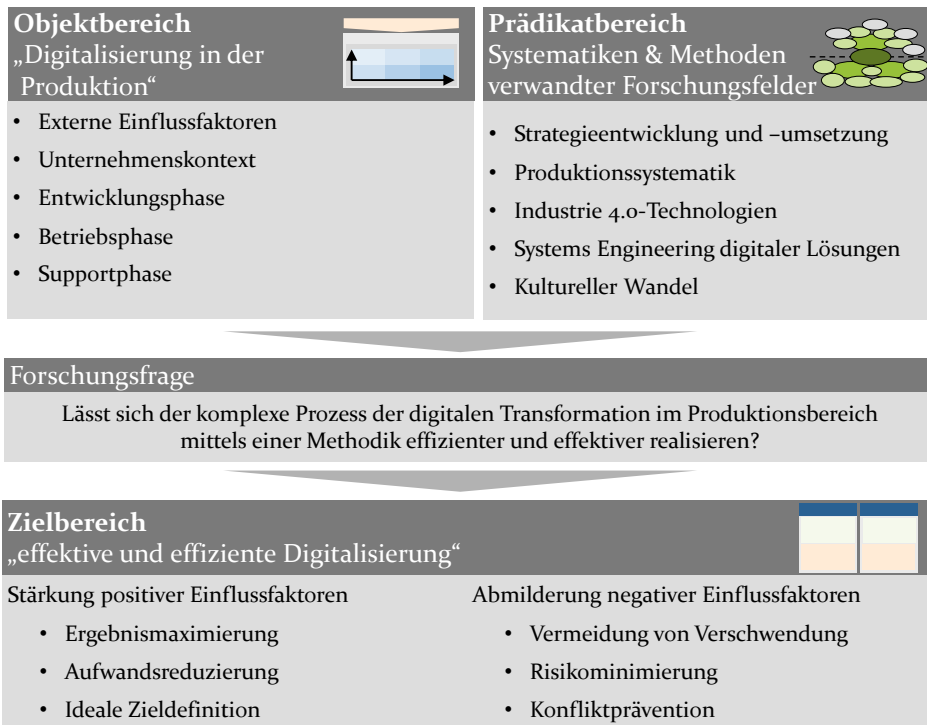


Bild 19: Übersicht der Kriterien zur Bewertung bestehender Ansätze i.A.a. [151]

Das erste inhaltliche Unterkriterium des *Objektbereichs* sind die Rahmenbedingungen der Digitalisierung im Produktionsbereich. Dazu gehören *externe Einflussfaktoren* und der *übergeordnete Unternehmenskontext*. Für eine ganzheitliche Betrachtungsweise der Digitalisierung werden weiterhin Aktivitäten anhand der drei Lebenszyklusphasen der *Entwicklung*, des *Betriebs* sowie des *Supports* auf Vollständigkeit geprüft. Die Bewertung des Objektbereichs sagt aus, wie umfassend und anwendungsagnostisch sich ein Forschungsansatz sich mit den genannten Unterkriterien befasst.

Die Unterkriterien des *Prädikatbereichs* stellen Vorgehensweisen und Methoden angrenzender Forschungsgebiete dar. Hierzu zählen die Forschungsbereiche der Fabrikplanung, I4.0-Technologien und das Systems Engineering von Digitalisierungslösungen. Darüber hinaus werden sowohl der Beitrag der Forschung zur Strategieentwicklung und -umsetzung als auch die Befähigung des kulturellen Wandels als Bewertungskriterium berücksichtigt. Die Bewertung des Prädikatbereichs spiegelt den Grad der Vollständigkeit bestehender Verfahren wider.

Die Unterkriterien des *Zielbereichs* zeigen sowohl positive als auch negative Einflussfaktoren auf die beiden Zielgrößen Effektivität und Effizienz. Die Bewertung des Zielbereichs richtet sich nach der zielgesteuerten Verminderung oder sogar Vermeidung negativer Einflussfaktoren und der Verstärkung positiver Einflussfaktoren. Während Bild 19 zur Übersicht der Erläuterung der Bewertungsgrundsätze dient, werden die drei Betrachtungsbereiche in den nachfolgenden Sektionen detailliert thematisiert. Dadurch wird eine Nachvollziehbarkeit der Bewertung bestehender Ansätze in Kapitel 2.3.3 gewährleistet.

Objektbereich

Zur detaillierten Betrachtung des Objektbereichs werden zu den genannten Bewertungskriterien weitere relevante Unter Aspekte der Digitalisierung im Produktionsbereich in Bild 20 in einem Schaubild systematisiert.

Das produzierende Unternehmen als Ganzes unterliegt *externen Einflüssen* wie den gesetzlichen Rahmenbedingungen, dem Wettbewerb sowie der kundenseitigen Nachfrage, welche auch aus dem technologischen Fortschritt resultieren. Das Kriterium des externen Einflusses sagt aus, inwiefern die genannten Einflüsse vom jeweiligen Ansatz holistisch berücksichtigt werden.

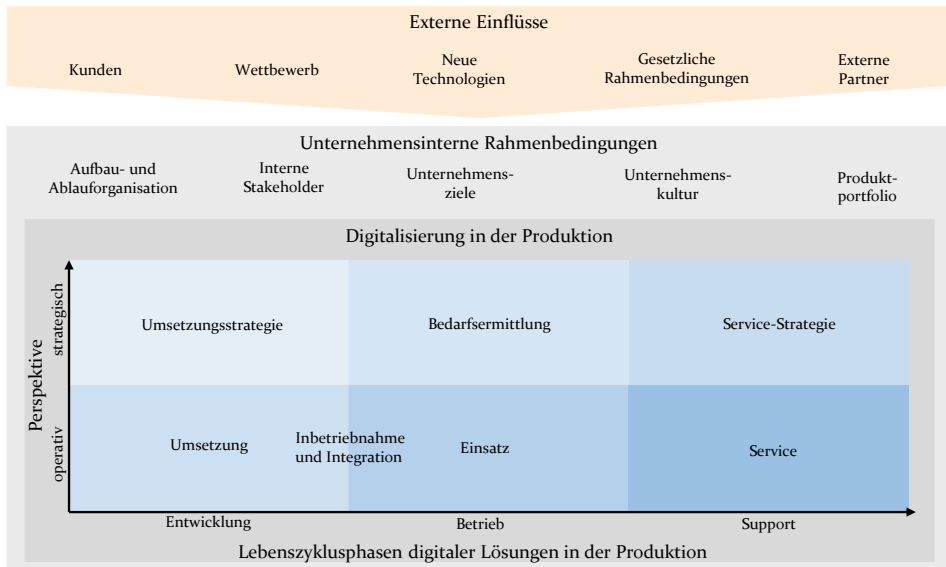


Bild 20: Systematisierung des Objektbereichs (Analysefokus) dieser Arbeit

Neben den externen Einflüssen steht die Digitalisierung in der Produktion im Wechselspiel mit unternehmensinternen Rahmenbedingungen. Dazu zählen die Aufbau- und Ablauforganisation, welche in Kombination mit der Unternehmenskultur das grundlegende Zusammenwirken der Mitarbeitenden im Unternehmen zur Erreichung strategischer Unternehmensziele definieren. Weiterhin ist die Produktionsstruktur maßgeblich auf die produktspezifischen Eigenheiten angepasst, die in unternehmensindividuellen Ausprägungen der Digitalisierung resultieren. Das Kriterium des *Unternehmenskontextes* sagt aus, inwiefern bestehende Ansätze die genannten Unter Aspekte berücksichtigen.

Die weiteren Bewertungskriterien stellen die drei Lebenszyklusphasen der *Entwicklung*, des *Betriebs* sowie des technischen *Supports* digitaler Lösungen dar. Diese können sowohl aus strategischer als auch operativer Perspektive betrachtet werden. Der operativen Umsetzung von Digitalisierungslösungen geht eine strategische Planung voraus. Digitale Lösungen gehen über die operative Inbetriebnahme von der Entwicklungsphase in die Anwendung über. Auf strategischer Ebene lassen sich während dieser Phase neue Bedarfe in Form von Verbesserungspotentialen sowie Innovationsideen ermitteln. Ein effektiver und effizienter Support von Digitalisierungslösungen wird durch eine Service-Strategie unterstützt. Die Bewertung der drei *Lebenszykluskriterien* fällt umso positiver aus, je vollständiger operative sowie strategische Aktivitäten abgedeckt werden.

Prädikatbereich

Die Elemente des Prädikatbereichs lassen sich, wie in den methodischen und modelltheoretischen Grundlagen beschrieben (vgl. Kapitel 3.1), in systematische und methodische Bestandteile gliedern. Systematische Bestandteile ordnen die Aktivitäten bestimmter Handlungsfelder in Form von Vorgehens-, Prozess- oder Entscheidungsmodellen. Methodische Vorgehensweisen geben vor, wie und mit welchen Hilfsmitteln gewisse Vorgänge durchzuführen sind.

Die Digitalisierung ist ein interdisziplinäres Forschungsfeld, welches eine Vielzahl von Schnittstellen zu angrenzenden Forschungsfeldern aufweist, wie Bild 21 schematisch illustriert.

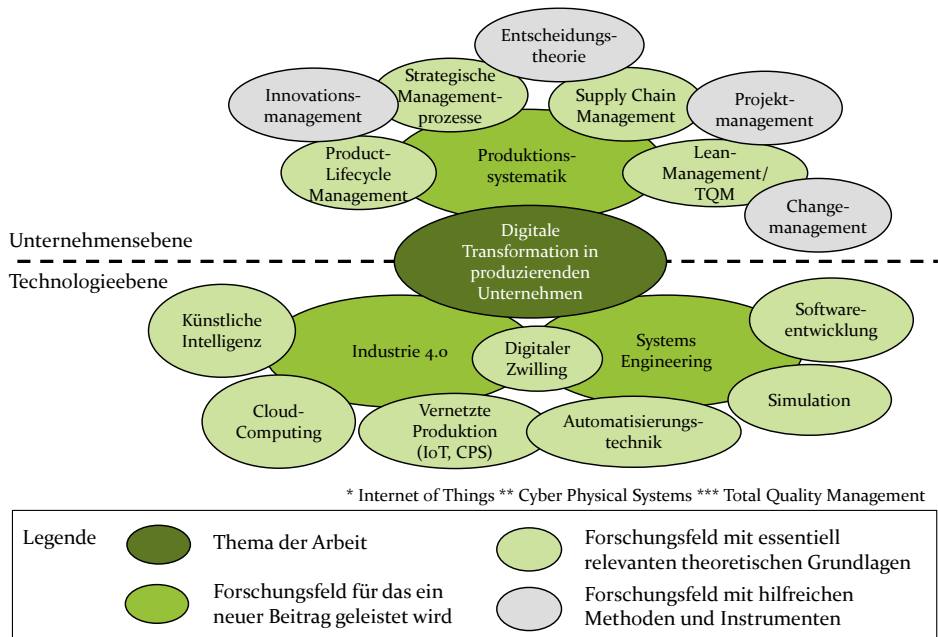


Bild 21: Darstellung relevanter Forschungsfelder des Prädikatbereichs sowie Verortung in Unternehmens- und Technologieebene i.A.a. [151]

Die digitale Transformation produzierender Unternehmen stellt das zentrale Thema dieser Arbeit dar. Angrenzende Forschungsfelder werden als Themen der Unternehmensebene bzw. der Technologieebene angesehen. Forschungsfelder der Unternehmenssicht nähern sich der Digitalisierung bedarfsgetrieben. Dazu zählt übergeordnet das Forschungsfeld der Produktionssystematik, dem die Strategieentwicklung und -umsetzung, die Fabrikplanung, das Production Lifecycle Management und das Lean-Management als untergeordnete Forschungsfelder zugewiesen sind. Weitere

relevante Forschungsansätze stammen aus den Bereichen des Innovations-, Change- und Projektmanagements sowie der Entscheidungstheorie. Ansätze, die unter dem Forschungsfeld I4.0 subsummiert werden, charakterisieren technologieseitige Beiträge zur Digitalisierung im Produktionsbereich. Dazu zählen das Cloud-Computing, Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz und die vernetzte Produktion. Weiterhin stellen Migrationskonzepte zur Einführung dieser Technologien in bestehende Brown-Field-Szenarien mittels Retrofitting-Techniken und Integrationsmethoden wichtige forschungsseitige Beiträge dar. Das Systems Engineering digitaler Lösungen für den Produktionsbereich ist eng mit den Fachdisziplinen der Automatisierungstechnik und der Softwareentwicklung verbunden, wie sich etwa in den Forschungsaktivitäten im Bereich cyberphysischer Produktionssysteme sowie des Digitalen Zwillings zeigt [P2]. Weiterhin gelten die Methoden des Anforderungsmanagements als relevante Grundlagen, da die Erfassung kundenseitiger Anforderungen stets den Ausgangspunkt für die operative Entwicklung neuer digitaler Lösungen bildet. Die Bewertung des Prädikatsbereichs sagt aus, wie vollständig angrenzende Forschungsgebiete und Technologiedomänen berücksichtigt werden.

Zielbereich

Den *Zielbereich* für die Digitalisierungsmethodik bilden die beiden Kriterien *Effizienz* und *Effektivität*, vgl. Kapitel 2.1.1. Die *Effizienz der Digitalisierung* setzt sich aus den Merkmalen eines minimalen Ressourceneinsatzes bei der Zielerreichung, Wiederverwendbarkeit, Flexibilität und Standardisierung der eingesetzten Lösungen zusammen. Die *Effektivität der Digitalisierung* wird durch die Vollständigkeit der Potentialerschließung, der Wirksamkeit und der Nachhaltigkeit charakterisiert. Aus diesen Charakteristika lassen sich positive sowie negative Einflussfaktoren ableiten (vgl. Bild 22).

Die Befähigung einer idealen Ressourcenauslastung entlang des Digitalisierungsprozesses und die Nutzung von Skaleneffekten wird als ergebnissteigernd bewertet. Ebenso stellt die Erzeugung wiederverwendbarer Lösungen ein positives Einflusskriterium dar, da diese die Grundlage für zukünftige Effizienz bildet. Weiterhin entspricht die gezielte Reduzierung von Aufwänden auf Basis der Befähigung asynchroner Arbeitsweisen und die Wahl aufwandsidealer Lösungskonzepte einem positiven Einfluss auf die Effizienz. Als ergebnismindernd wird die Über- bzw. Unterforderung von Arbeitskräften z.B. aufgrund unkonkreter Zielstellungen und die Inkaufnahme redundanter Arbeiten bewertet. Zudem ist Verschwendung in Form

von ineffizienter Kommunikation, ineffizienten Prozessen und Interessenskonflikten pro aktiv vorgebeugt werden.

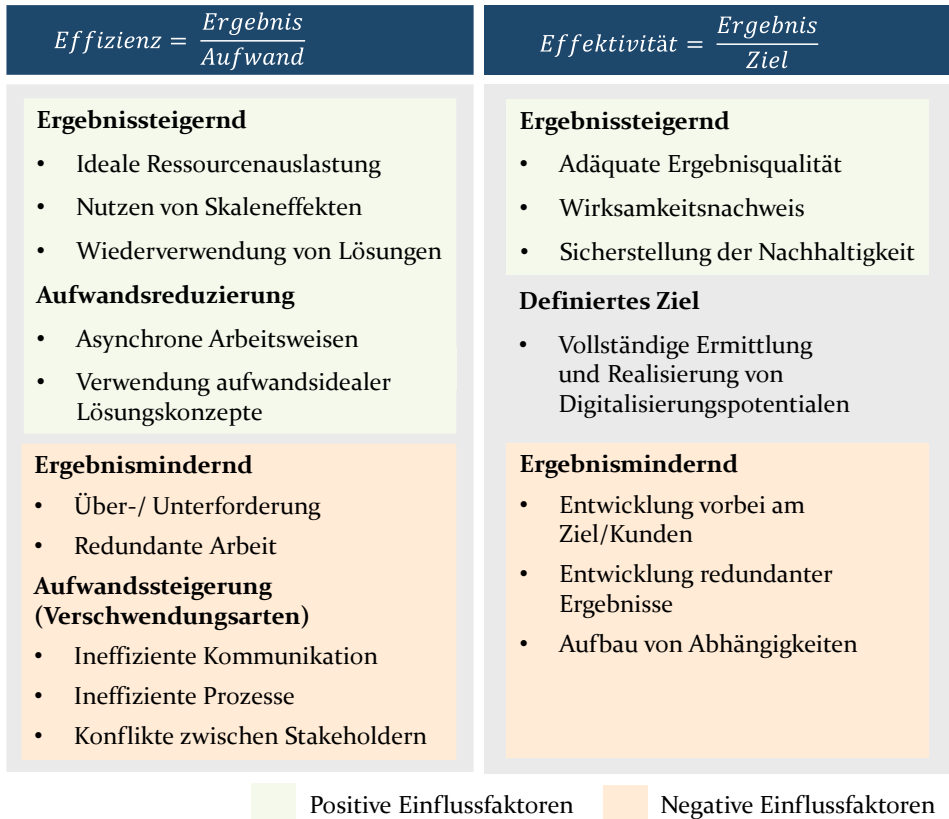


Bild 22: Darstellung positiver und negativer Einflussfaktoren auf den Zielbereich der "effizienten und effektiven Digitalisierung"

Hinsichtlich der Bewertung des Effektivitätskriteriums ist die Sicherstellung der Ergebnisqualität und der Nachhaltigkeit als ergebnissteigernd zu sehen. Weiterhin steigt die Effektivität der Digitalisierung mit der Eindeutigkeit und Vollständigkeit der Zielzustandsbeschreibung. Hierzu ist eine möglichst umfassende Betrachtung der Digitalisierungspotentiale zu gewährleisten. Die Bewertung des Zielbereichs sagt aus, wie stark positive und negative Einflussfaktoren im jeweiligen Ansatz berücksichtigt werden.

2.3.2 Darstellung bestehender Ansätze

Im Folgenden werden aus den bestehenden Ansätzen des Forschungsfelds zehn selektiert, die nach dem angewandten Punktwertverfahren die höchste Gesamtpunktzahl erzielt haben. Die ausgewählten Ansätze werden nach aufsteigendem Veröffentlichungsdatum vorgestellt und diskutiert. Die zugehörigen Bewertungsergebnisse sind der Bewertungsmatrix in Kapitel 2.3.3 zu entnehmen.

Kagermann (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. [152]

Im Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0 werden mittel- und langfristige Handlungsbedarfe zusammengetragen und identifiziert. Der hierbei skizzierte Lösungsraum spannt die Vision von *horizontal vernetzten Wertschöpfungsketten, vertikal vernetzten Produktionssystemen* und der *digitalen Durchgängigkeit des Engineerings* auf. Detailliert wird die Vision durch die umfassende Beschreibung generischer Handlungsfelder: *Standardisierung, Beherrschung komplexer Systeme, flächendeckende Breitbandinfrastruktur, Sicherheit, Arbeitsorganisation, Mitarbeiterausbildung, rechtliche Rahmenbedingungen* und *Ressourceneffizienz*. Weiterhin wird der Forschungsbedarf in Form von Forschungsempfehlungen zu den genannten Handlungsfeldern aufgezeigt, welche im Einklang mit der durch die Industrie 4.0-Initiative der Bundesregierung ausgerufenen Erwartungen stehen. Der o.g. Beitrag beschreibt die Vision von I4.0 in konsolidierter Form, steckt damit den potentiell denkbaren Lösungsraum weiträumig ab und bildet damit eine Grundlage für die Entwicklung von I4.0-Reifegradmodellen zur Strategieentwicklung [152]. Operative Vorgehensweisen zur Strategieumsetzung werden jedoch nicht dargelegt.

Frank, Anderl et al. (2015): Generisches Vorgehensmodell zur Einführung von Industrie 4.0 in mittelständischen Unternehmen der Serienfertigung [153]

Das vorgestellte Vorgehensmodell richtet sich an kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die einen Erstkontakt mit I4.0 herstellen möchten. In diesen Rahmen gliedert das Modell den Themenkomplex in handhabbare und logische Teilschritte. Die Einführung von I4.0 wird hierbei in fünf Phasen gegliedert: *Vorbereitung, Analyse, Ideengenerierung, Bewertung* und *Umsetzung*. Zu den einzelnen Phasen werden Vorgehensweisen, Methoden und Ergebnisse skizziert, mit denen sich ein Überblick potenzieller Handlungsfelder generieren lässt. Der Fokus des Ansatzes liegt auf einem initialen Technologie-Push und nicht auf einem fortwährenden Digitalisierungs-

prozess. Für die Operationalisierung von Digitalisierungsaktivitäten fehlt eine tiefergehende Vorgehensweise, welche die hierbei vorliegenden Herausforderungen adressiert. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass das Vorgehensmodell die Basis für eine initiale Beratung und ein Self-Assessment in Bezug auf die Digitalisierung bietet [153].

Anderl, Fleischer et al. (2015): Leitfaden Industrie 4.0 [154]

In einem Leitfaden für den Mittelstand des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus wird die Vision von I4.0 in realisierbare Entwicklungsstufen heruntergebrochen. Der Leitfaden gliedert sich in fünf generische Phasen: *Vorbereitung, Analyse, Kreativität, Bewertung, Einführung*. Der im Leitfaden detaillierte Kern des Vorgehens, ist für die Durchführung in einem interdisziplinären Workshop vorgesehen. Das wesentliche zum Einsatz kommende Werkzeug der Kompetenzanalyse und Ideengenerierung stellt der Werkzeugkasten Industrie 4.0 dar, der sich in die zwei Teilbereiche „Produktion“ und „Produkt“ gliedert. Der Leitfaden setzt die Bildung eines Projektteams bzw. einer I4.0-Initiative voraus und bietet für die Identifikation von Handlungsfeldern und Stoßrichtungen eine methodische Hilfestellung [154].

Bildstein, Seidelmann (2017): Migration zur Industrie 4.0-Fertigung [56]

Die vom Fraunhofer IPA entwickelte Methodik zur Migration von I4.0-Konzepten in bestehende Fertigungen beinhaltet einen siebenstufigen Prozess, der sich in drei Hauptabschnitte unterteilt. Im ersten dieser Schritte werden bestehende Prozesse hinsichtlich der Relevanz für die I4.0-Fertigung betrachtet und in einer entsprechenden *Prozesslandkarte* dokumentiert. Im zweiten Schritt werden die identifizierten Prozesse mit I4.0-Standardanwendungsfällen, die in einem *I4.0-Werkzeugkasten* beschrieben sind, abgeglichen und erste Kosten-Nutzen-Schätzungen als *Entscheidungsgrundlage* für die Umsetzungsplanung, welches die dritte und letzte Phase darstellt, getroffen. Die Umsetzungsplanung wird als ein *iteratives Vorgehen* beschrieben und umfasst darüber hinaus die enge Kollaboration zwischen Mitarbeitenden, Kunden und Lieferanten. Der Ansatz weist eine Fokussierung auf die Optimierung existierender Prozesse mittels I4.0-Technologien auf, beschränkt sich dabei jedoch auf die die Identifikation von Handlungsfeldern [56].

Weinert et al. (2017): Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik [155]

Für die Durchführung des digitalen Wandels wird eine Vorgehensweise vorgestellt, welche die sechs Phasen *Interne Analyse*, *Identifikation von Lösungselementen*, *Entwicklung des Zielszenarios*, *Auswahl wesentlicher Lösungselemente*, *Festlegung der Transformationsstrategie* sowie *Realisierung und Bewertung* differenziert. Die mit diesem Vorgehen erstellten Implementierungspfade dienen als Blaupause einer vernetzten und intelligenten Fabrik. Entlang des Vorgehens werden die drei Gestaltungsdimensionen *Mensch*, *Technik* und *Organisation* betrachtet und das Vorgehen mit entsprechenden Methoden und unterstützenden Werkzeugen angereichert. Die Methodik legt den Schwerpunkt auf die Entwicklung einer I4.0-Implementierungsroadmap, die Anpassung der Organisationsstruktur und die Ableitung benötigter Kompetenzprofile, wodurch eine umfangreiche methodische Detaillierung entsteht [155]. Für ein vollständiges Vorgehen fehlen jedoch Prozessmodelle für die Integration des Ansatzes in den Unternehmenskontext und Vorgehensweisen für die Umsetzung der Digitalisierungsroadmap.

Lanza, Nyhuis (2018): Befähigungs- und Einführungsstrategien [156]

Die vorgestellte Methodik dient der unternehmensspezifischen Entwicklung einer I4.0-Strategie ausgehend vom Erstkontakt und richtet sich an KMUs. Potentiale für den Einsatz von I4.0-Technologien werden mithilfe eines Reifegradmodells sowie einer im Rahmen des Forschungsprojektes „Intro 4.0“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) erstellten I4.0-Methoden-Toolbox, bestehend aus insgesamt 60 bewährten Vorgehensweisen, Verfahren und Best Practices, ermittelt [157]. Die identifizierten Handlungsfelder werden in Einführungsreihenfolgen definiert, die eine strategische I4.0-Roadmap ergeben. Ergänzend kann bei diesem Teilschritt die Methodik zur Entscheidungsunterstützung für den I4.0-Methodeneinsatz nach Liebrecht eingesetzt werden [158]. Zusammengefasst lässt sich das Vorgehen als ein strategischer Technologie-Push-Ansatz beschreiben, da der Veränderungsprozess durch eine Top-Down-Initiative angestoßen wird. Die Einbindung und Vorbereitung der Mitarbeitenden auf den bevorstehenden Wandel erfolgt durch ein begleitendes Change-Management [156]. Nicht im Fokus steht eine schlanke, bedarfsgetriebene Digitalisierung. Ebenso werden operative Herausforderungen bei der interdisziplinären Zusammenarbeit verschiedener Fachdomänen vernachlässigt.

Calà (2019): A novel migration approach towards decentralized automation in cyber-physical production systems [159]

In der Dissertation von Calà werden bestehende Migrationsstrategien *Big Bang*, *Parallel Systems* und *Phased Introduction* in einen kontinuierlichen Migrationsprozess integriert, welcher aus den fünf Phasen *Preparation*, *Options Investigation*, *Design*, *Implementation* und *Deployment* besteht. Die erste Phase umfasst die Ermittlung der Ausgangssituation sowie die Entwicklung einer langfristigen Vision. Wie die meisten Vorgehensmodelle wird eine Initiative als Startbedingung vorgesehen. In der zweiten Phase werden technische Lösungsalternativen hinsichtlich des Wandels zu einem CPPS mittels eines Assessments evaluiert und schließlich ausgewählt. In der dritten Phase wird die Ziellösung auf Basis der Bedarfe und Anforderungen der vorherigen Phasen entwickelt. Die vierte Phase beinhaltet die Realisierung der Systemkomponenten durch die Einbindung bestehender Vorgehensmodelle aus dem Bereich des Systems Engineering. In der fünften Phase wird die entwickelte Lösung integriert und validiert. Anschließend ist der kontinuierliche Gesamtprozess erneut zu durchlaufen [159]. Während der Fokus der Methodik auf der Entwicklung von CPPS liegt, fehlt für eine anwendungsagnostische Digitalisierung die Betrachtung weiterer digitaler Technologien (vgl. Bild 5).

Krüger, Verl (2019): RetroNet – Retrofitting von Maschinen und Anlagen für die Vernetzung mit Industrie 4.0-Technologie [160]

Das BMBF-Forschungsprojekt RetroNet leistet einen Beitrag zur Behebung von Digitalisierungsdefiziten in mittelständischen Fertigungsunternehmen, indem die Transformation von Altanlagen zu einer digitalisierten und vollständig vernetzten Fertigung mittels methodischer Konzepte und technischen Werkzeugen für das Retrofitting aufgezeigt werden. Die im Abschlussbericht vorgestellte Lösung präsentiert ein generisches Anlageneinbindungskonzept bei dem Anlagedaten mittels eines sog. I4.0-Konnektors an eine I4.0-Plattform geleitet werden, die dem Betrieb digitaler Anwendungen dient [160]. Die dargelegten methodischen Konzepte konzentrieren sich auf einen technischen Lösungsaspekt von I4.0 und dies aus Sicht der Betriebstechnik. Es fehlt eine domänenüberspannende Betrachtung bei der Lösungskonzeptentwicklung sowie die Verknüpfung mit vor- und nachgelagerten Aktivitäten eines übergeordneten Vorgehensmodells, welches für die Integration im Unternehmenskontext notwendig ist.

Von See (2019): Ein Handlungsrahmen für die digitale Transformation in Wertschöpfungsnetzwerken [161]

Mithilfe eines Mixed-Method-Ansatzes identifiziert von See in ihrer Dissertation auf der Basis von Experteninterviews und Online-Fragebögen die Veränderungstreiber der Digitalisierung: *weltwirtschaftliche Rahmenbedingungen, Marktanforderungen* sowie die *unternehmensinterne Notwendigkeit der Digitalisierung*. Des Weiteren wird ein soziotechnisch orientierter Handlungsrahmen erarbeitet, der die drei Dimensionen *Mensch, Technik* und *Organisation* beinhaltet und zugehörige Handlungsfelder beschreibt. Aufbauend auf diesem Handlungsrahmen werden Faktoren zur Steigerung der Anpassungsfähigkeit im Kontext der digitalen Transformation abgeleitet. Der Schwerpunkt des Handlungsrahmens liegt im Bereich des betriebswirtschaftlichen SCM, nicht aber der technischen Umsetzung. In Bezug auf ein vollständiges Vorgehensmodell der Digitalisierung werden zwei Forschungsbedarfe herausgearbeitet nämlich die *Ausrichtung an Problemen der Praxis* und die *ganzheitliche, soziotechnische Perspektive* [161].

Schuh et al. (2020): Industrie 4.0 Maturity Index [162]

Der Industrie 4.0 Maturity Index dient dem übergeordneten Ziel den I4.0-Reifegrad eines Unternehmens zu bestimmen und davon ausgehend Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten, um den wirtschaftlichen Nutzen der Digitalisierung zu realisieren. Anhand des vorgestellten Reifegradmodells werden die vier Gestaltungsfelder Ressourcen, Informationssysteme, Organisationsstruktur und Kultur bewertet und Verbesserungspotentiale sog. „Gaps“ in Abstimmung mit den Unternehmenszielen identifiziert. Das Ergebnis ist eine unternehmensindividuelle Digitalisierungs-Roadmap, die als Umsetzungsleitfaden bei der digitalen Transformation hin zu einem agilen und lernenden Unternehmen dient. In Bezug auf ein vollständiges Vorgehensmodell fehlen methodische Vorgehensweisen zur fortlaufenden, operativen Umsetzung der entwickelten Strategien sowie die damit verbundene Spezifikation zugehöriger Informationsartefakte. Das kennzahlen- und technologiegetriebene Vorgehen ist als Methode zur Strategieentwicklung einzuordnen [162].

2.3.3 Bewertung bestehender Ansätze

Tabelle 2 stellt die in Kapitel 2.3.2 dargestellten Ansätze im Forschungsfeld in einer qualitativen Bewertung gegenüber. Hierbei wurde je Ansatz der Abdeckungsgrad der in Kapitel 2.3.1 dargestellten Kriterien mittels eines Punktwertverfahrens analysiert. In der Reflexion der Ergebnisse wird ersichtlich, dass eine hohe Anzahl vielversprechender Lösungsansätze, jedoch stets mit individuellen Voraussetzungen sowie Stärken und Schwächen, existieren.

Im Hinblick auf die Kriterien des Objektbereichs zeigt sich, dass bestehende Ansätze insbesondere Defizite bei der Betrachtung des individuellen Unternehmenskontextes aufweisen, überwiegend wird sich auf die Evaluation wiederkehrender Lösungskonzepte beschränkt. Bei der Betrachtung der Lebenszyklusphasen, insbesondere der Phasen des Betriebes sowie der Instandhaltung, greifen bestehende Ansätze zu kurz. Im Fokus stehen überwiegend externe Umwelteinflüsse, die Identifikation von Einsatzbereichen und die Grobkonzeption von digitalen Lösungen.

Im Hinblick auf die Kriterien des Prädikatbereichs fällt auf, dass die gestalterischen Mittel bestehender Ansätze verstärkt die Strategieentwicklung adressieren. Herangehensweisen zur Operationalisierung von Strategien werden thematisiert, jedoch kommt hierbei der Einsatz grundlegender produktionssystematischer Verfahren und die Methoden des Systems Engineerings werden im Kontext der Digitalisierung zu kurz. Für eine nachhaltige Verankerung von Digitalisierungsaktivitäten in die Prozessstrukturen (vgl. Bild 14) von Unternehmen wird die Spezifikation eines durchgängigen Prozessmodells vermisst.

Aufgrund der fehlenden vollständigen Betrachtung des Objektbereiches werden auch die Zielgrößen der Effektivität und der Effizienz nur unzulänglich berücksichtigt. Insgesamt wird ein Übergewicht bezüglich der Effizienz gegenüber dem Kriterium der Effektivität diagnostiziert. Dies wird darauf zurückgeführt, dass bestehende Ansätze zur Digitalisierung oft eine dedizierte Digitalisierungsinitiative mit einem starken Technologie-Push-Charakter forcieren, nicht aber die Etablierung eines harmonisierten, fortwährenden und nachhaltigen Digitalisierungsprozesses.

Folglich wird der Bedarf einer vollständigen und anwendungsagnostischen Methodik für den komplexen Transformationsprozess der Digitalisierung im Produktionsbereich abgeleitet.

Tabelle 2: Kriterienbasierte Bewertung bestehender Ansätze im Forschungsfeld

Legende: Betrachtung der Bewertungskriterien

- keine
- ◐ teilweise
- ◑ grundlegend
- ◒ ausführlich
- ◓ umfassend

Autor, Jahr	Kurzform des Titels	Objektbereich					Prädikatbereich				Zielbereich		Ø	
		Externe Einflüsse	Unternehmenskontext	Entwicklung	Betrieb	Support	Strategieentwicklung	Umsetzungsmanagement	Produktionssystematik	Systems-Engineering	Kultureller Wandel	Effektivität		Effizienz
Kagermann et al. (2013)	Umsetzungsempfehlungen für I4.0	○	◑	○	◑	○	◑	◑	○	○	○	◑	◑	◑
Frank, Anderl et al. (2015)	I4.0-Vorgehensmodell	◑	○	◑	◑	○	◑	○	○	◑	◑	◑	◑	◑
Anderl, Fleischer (2015)	I4.0-Leitfaden	◑	○	◑	○	○	◑	◑	○	◑	◑	◑	◑	◑
Bildstein, Seidelmann (2017)	Siebenstufiger Einführungsprozess für I4.0	◓	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	○	◑	◑	◑	◑
Weinter, Plank et al. (2017)	Vorgehensweise zur I4.0-Transformation	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Lanza, Nyhuis (2018)	Befähigungs- und Einführungsstrategien	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Calà (2019)	Migrationsansatz für CPS	◑	◑	◑	◑	○	○	◑	○	◑	○	◑	◑	◑
Krüger, Verl (2019)	Retrofitting von Fertigungsanlagen	◑	◑	◑	○	◑	○	◑	○	◑	◑	◑	◑	◑
von See (2019)	Handlungsrahmen der digitalen Transformation	◑	○	◑	◑	○	◑	◑	○	○	◑	◑	◑	◑
Schuh et al. (2020)	I4.0-Reifegradindex	◑	◑	○	◑	○	◑	◑	◑	○	◑	◑	◑	◑
	Ø	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑

2.3.4 Handlungsbedarf

In Anlehnung an den Stand der Technik und Forschung wird in diesem Kapitel der Handlungsbedarf im Kontext der effizienten Digitalisierung in produzierenden Unternehmen aufgezeigt. Dieser besteht aus verschiedenen praktischen Problemmerkmalen sowie Forschungsdefiziten. Bevor ein Lösungsansatz beschrieben wird, fassen die sieben Thesen in Bild 23 die Inhalte aus Kapitel 2 zusammen.

Thesen für die effiziente Digitalisierung in produzierenden Unternehmen		PMs	FDs
These 1	Für die erfolgreiche Digitalisierung ist eine ganzheitliche und fortlaufende Erfassung von Potentialen und Chancen neuer Technologien notwendig.	2.1, 2.2, 3.1	1.2, 2.1
These 2	Nutzererwartungen für Digitalisierungsthemen sind systematisch zu erheben.	1.1, 2.1	2.1
These 3	Für die Entwicklung optimaler Lösungskonzepte wird ein methodisches Vorgehen benötigt, welches die interdisziplinäre Zusammenarbeit systematisiert.	2.1, 3.3	2.2
These 4	Für die Durchführung von Digitalisierungsprojekten sind zunächst geeignete Projektkonstellationen systematisch zu konzipieren.	3.2	2.3
These 5	Für eine effiziente Durchführung von wechselwirkenden Digitalisierungsprojekten ist ein Vorgehen zur Harmonisierung notwendig.	1.2, 3.2	1.2
These 6	Für die Erfolgsmessung von Digitalisierungsprojekten ist ein systematischer Ansatz zu Messung deren Effektivität und Effizienz erforderlich.	2.2	1.2
These 7	Für Orchestrierung und Choreographie aller Einzelaktivitäten der effizienten Digitalisierung und zur Förderung des begleitenden, kontinuierlichen Lernprozesses im Unternehmen eignet sich ein prozessbasierter Ansatz.	2.2, 3.2	1.1

Praktische Problemmerkmale (PM)		Forschungsdefizit (FD)	
PM1	Unsicherheiten	FD1	Defizite der Systematik
PM1.1	• Unsicherheiten bei der Umsetzungsplanung aufgrund fehlender Informationen	FD1.1	• Fehlendes durchgängiges Prozessmodell für die Realisierung des digitalen Wandels in Produktionssystemen
PM1.2	• Unsicherheiten während der Projektlaufzeit aufgrund der Themenkomplexität	FD1.2	• Fehlende Systematik für die Methodenauswahl bei der Durchführung von Teilprozessen
PM2	Soziale Komplexität	FD2	Defizite der methodischen Detaillierung
PM2.1	• Interessens- und Zielkonflikte	FD2.1	• Fehlende Spezifikation der auszutauschenden Informationen zwischen Teilschritten zur Befähigung asynchroner Arbeitsweisen
PM2.2	• Erfordernis neuer Denk- und Verhaltensweisen	FD2.2	• Fehlende durchgängige Berücksichtigung ganzheitlicher Betrachtungsweisen
PM3	Eigendynamik des Produktionssystems	FD2.3	• Fehlende Förderung der interdisziplinären Zusammenarbeit
PM3.1	• Intransparenz bei der Abbildung des Ausgangszustandes		
PM3.2	• Hoher Synchronisationsbedarf zwischen Digitalisierungsaktivitäten		
PM3.3	• Dynamische Herausforderungen beim Einsatz volatiler, neuer Technologien		

Bild 23: Thesen dieser Arbeit und zugrundeliegende Problemmerkmale sowie forschungsseitiger Handlungsbedarf

Die erste These zeigt, dass eine optimale Digitalisierung eine ganzheitliche Erfassung aller Digitalisierungspotentiale und -chancen erfordert. Herausfordernd sind die Beherrschung der sozialen Komplexität, welche u.a. Interessenskonflikte birgt, und der kulturelle Wandel hin zu neuen Denk- und Verhaltensweisen. Auf der Eigendynamik des Produktionssystems, die zu einem stets veränderlichen Ausgangszustand führt, wird die Notwendigkeit einer fortlaufenden Erfassung der Digitalisierungspotentialen begründet. Forschungsseitig bedarf es einer Systematisierung von Methoden zur Erfassung von Digitalisierungsideen und der Spezifikation der notwendigen Prozesse und Informationen, um eine dezentrale Erfassung und Analyse von Digitalisierungspotentialen zu unterstützen.

Die zweite These fordert eine systematische Ermittlung der Nutzenerwartungen von Digitalisierungsthemen. Erschwert wird dieser Prozess durch existierende Unsicherheiten aufgrund fehlender Informationen bei der strategischen Umsetzungsplanung. Fehleinschätzungen bei strategischen Entscheidungen führen jedoch gerade in diesem frühen Stadium zu Desorientierung oder bieten Nährboden für zukünftige Zielkonflikte zwischen Stakeholdern. Zur Sicherstellung einer hohen Durchführungsqualität von Nutzenprognosen sind systematische Defizite der Methodenauswahl zu beheben.

Die dritte These definiert interdisziplinäre Entwicklungsansätze als Erfolgsfaktor für die Digitalisierung. Dadurch soll der Entstehung von Interessenskonflikten aufgrund unterschiedlicher technologie- oder strategiebezogener Zielsetzungen betroffener Fachdomänen vorgebeugt werden. Auch hier gilt es mit einer Eingliederung der Konzeptionierungsphase in ein übergeordnetes Prozessmodell, die notwendige Sorgfalt bei Konzeptentscheidungen sicherzustellen und mittels einer interdisziplinären Entwicklungsmethoden zu unterstützen. Letztere hat für eine effiziente Kollaboration verschiedener Fachdomänen eine gemeinschaftliche Sprache, Abläufe und Schnittstellen zu definieren.

Die vierte These verlangt nach einer ganzheitlichen Planung und Vorbereitung von Digitalisierungsprojekten. Eine zu berücksichtigende Variable stellen hierbei Unsicherheiten aufgrund der Themenkomplexität dar. Weiterhin sind der Entwicklungskontext und etwaige andere, wechselwirkende Digitalisierungsprojekte zu beachten. Ebenfalls hat die Zusammenstellung der Projektkonstellation maßgeblichen Einfluss auf die Synchronisationsaufwände und damit auf die Durchführungseffizienz. Zur Gewährleistung einer hohen Durchführungsqualität der Projektplanung und -vorbereitung sind die damit verbundenen Prozesse methodisch anzuleiten.

Die fünfte These erklärt ein Vorgehen zur Harmonisierung von wechselwirkenden Digitalisierungsprojekten als notwendig. Projektübergreifende Steuerungsmechanismen sichern die normative Durchführungsqualität von Projekten und betrachten Risiken und Abhängigkeiten zwischen Projekten ebenso wie Chancen aufgrund von Synergieeffekten. Hierbei ist die vollständige Ausschöpfung etwaiger Harmonisierungspotentiale sicherzustellen.

Die sechste These gibt vor, dass eine Effektivitäts- und Effizienzmessung von Digitalisierungsaktivitäten für eine erfolgreiche Digitalisierung notwendig ist. Die davon ableitbaren Erkenntnisse, welche in die Anbahnung, Planung und Durchführungen nachfolgender Digitalisierungsaktivitäten einfließen, fördern eine stetige Weiterentwicklung der Digitalisierungskompetenz des jeweiligen Unternehmens. Für die Ermittlung der Effektivität und Effizienz der Digitalisierung ist eine ganzheitliche Betrachtung der Kausalketten von der Ideenentwicklung bis hin zum Betrieb erforderlich.

Die siebte These deklariert einen prozessbasierten Ansatz als geeignet, um die Unteraktivitäten der Digitalisierung umfassend und handhabbar abzubilden. Hierfür fehlt ein durchgängiges und ausdetailliertes Vorgehensmodell, welches nachweislich sowohl den kulturellen als auch technologischen Wandel in produzierenden Unternehmen fördert.

3 Konzeption der DMAICS-Methodik

Aufgrund des in Kapitel 2.3.4 aufgezeigten Handlungsbedarfs wurde auf Basis des Stands der Technik und Tätigkeiten im Rahmen einer vierjährigen Forschungsk Kooperation der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und einem Medizintechnikunternehmen die DMAICS-Methodik synthetisiert. Diese stellt den zu validierenden Lösungsweg zur vollständigen und anwendungsagnostischen Digitalisierung in produzierenden Unternehmen dar. Die Idee des Vorgehensmodells ist inspiriert durch den aus dem Qualitätsmanagement bekannten DMAIC-Zyklus [163]. Aufgrund des evolutionären, iterativen Charakters der Digitalisierung stellt die zyklische Natur dieses Prozesses eine passende Analogie dar. Bild 24 illustriert das übergeordnete Vorgehensmodell des DMAICS-Zyklus.

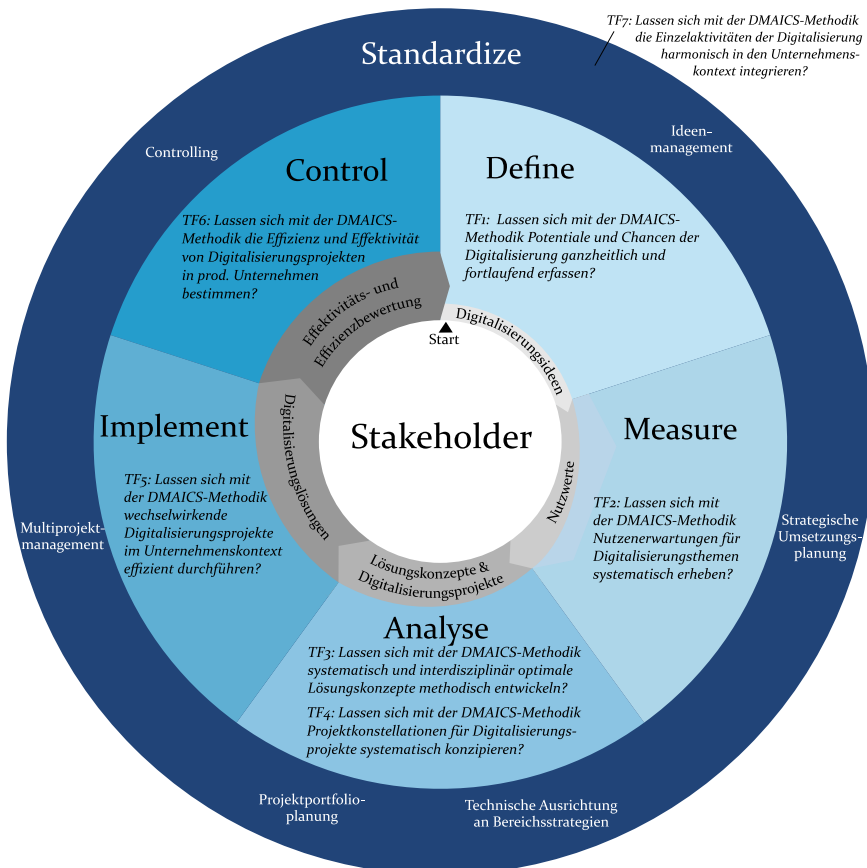


Bild 24: Konzeptionierung des übergeordneten Vorgehensmodells der DMAICS-Methodik sowie Verortung der Teilforschungsfragen i.A.a. [163]

Der DMAICS-Zyklus besteht aus fünf Phasen sowie einer phasenüberspannenden Standardize-Schale, welche standardisierte Einbindungspunkte des DMAICS-Zyklus in den Unternehmenskontext definiert. Zu den einzelnen Phasen des DMAICS-Zyklus lassen sich Teilforschungsfragen zuordnen, welche aus den Thesen aus Kapitel 2.3.4 entwickelt wurden. Da die Digitale Transformation durch schlussendlich durch die Mitarbeitenden im Rahmen ihrer Verantwortlichkeiten angestoßen und durchgeführt wird, steht der Begriff Stakeholder symbolisch im Zentrum der Methodik.

Die erste Phase des DMAICS-Zyklus stellt die *Define*-Phase dar, die sich mit der ersten Teilforschungsfrage, der ganzheitlichen und fortlaufenden Potential- und Chancenerfassung im Kontext der Digitalisierung, befasst. Koordiniert wird dieser Ideenerfassungsprozess durch das Ideenmanagement. Aus der *Define*-Phase resultiert ein geordneter Speicher aller Digitalisierungsideen.

Aufbauend auf diesem Ideenspeicher werden in der *Measure*-Phase die zu erwartenden Nutzwerte aller, aufgrund ihrer Priorisierung selektierten, Digitalisierungsideen prognostiziert. Auf strategischer Ebene geschieht die Ausrichtung der Digitalisierungsideen an den Unternehmenszielen im Rahmen der strategischen Umsetzungsplanung.

Im ersten Teil der *Analyze*-Phase entstehen in einem interdisziplinären Ansatz optimale Lösungskonzepte hinsichtlich operativer und strategischer Aspekte verschiedener Fachdomänen. Anhand der Lösungskonzepte können die Aufwände abgeschätzt und den in der *Measure*-Phase ermittelten Nutzwerten zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit gegenübergestellt werden. Im zweiten Teil der *Analyze*-Phase werden Digitalisierungsprojekte durch die Entwicklung von Projektstrukturen, die Bildung geeigneter Projektkonstellationen und die Spezifikation des Projektinhalts vorbereitet.

Die Projektdurchführung wird in der *Implement*-Phase behandelt. Es werden insbesondere Wechselwirkungen mit dem dynamischen Produktionsumfeld und externen Einflussfaktoren berücksichtigt. Wechselwirkungen und Synergien zwischen Projekten werden über ein Multiprojektmanagement betrachtet. Das Ergebnis sind die umgesetzten Digitalisierungslösungen, deren Effektivität und Effizienz in der abschließenden *Control*-Phase ermittelt werden. Die daraus gewonnenen Lernerfahrungen dienen als Ausgangspunkt für weitere Digitalisierungszyklen.

Die übergreifende *Standardize*-Schale adressiert Aspekte der Orchestrierung der Einzelaktivitäten der DMAIC-Phasen und nutzt zudem Synergieeffekte aus strategischen Handlungsmustern. Durch die Harmonisierung

aller Aktivitäten lässt sich die Effektivität und die Effizienz der Digitalisierung nicht nur in den operativen Einzelaktivitäten sondern auch im übergeordneten Unternehmenskontext optimieren.

Die fünf Phasen sowie die Standardize-Schale der DMAICS-Methodik werden in Kapitel 4 detailliert. Im aktuellen Kapitel werden zunächst der Methodikbegriff und modelltheoretische Grundlagen dargelegt (vgl. Kapitel 3.1). Ergänzend zu dem in Kapitel 2.3.4 herausgestellten Handlungsbedarf, welcher die inhaltlichen Anforderungen an die Methodik beschreibt, werden in Kapitel 3.2 die formalen Anforderungen an die Methodik erläutert. Diese werden bei der Methodik-Validierung in Kapitel 4.5.3 als Bewertungskriterien verwendet.

3.1 Methodische und modelltheoretische Grundlagen

In der Praxis werden die im Deutschen eng verwandten Begriffe *Methodik* und *Methodologie* nahezu synonym verwendet. Während der Begriff *Methodologie* die Lehre von Methoden bezeichnet, beschreibt der vom griechischen „methodike“ abstammende Begriff der *Methodik* die „Kunst des planmäßigen Vorgehens“ [164]. Basierend auf diesem Verständnis beschreibt Beer eine Methodik als ein „systematisch-logische[s] Vorgehen auf ein bestimmtes Ziel hin“ [164]. Im Einklang mit diesem Verständnis bezeichnet Jenke eine Methodik als den „jeweiligen Regelkanon bestimmter Methoden“ [165]. Jenke konkretisiert diese Definition in einem allgemeinen Methodikmodell [165] (siehe Bild 25), das bereits in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage dient, vgl. [166–168].

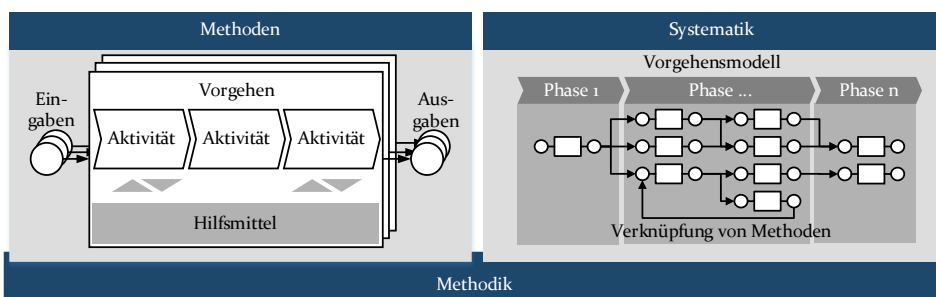


Bild 25: Methodikmodell i.A.a. Jenke [165]

Nach dem Methodikmodell von Jenke setzt sich eine Methodik aus mehreren Methoden sowie einer Systematik zusammen, die diese logisch miteinander verknüpft [165]. Zur Handhabung komplexer Systematiken werden die entstehenden Methodenkombinationen in Phasen eines übergeordneten Vorgehensmodells untergliedert. Methoden charakterisieren sich

durch ein *planmäßiges Vorgehen* und die Verwendung von *Hilfsmitteln und Werkzeugen*. Damit liegt der Fokus von Methoden in Abgrenzung zu einer *Aufgabe* oder einem *Prozess*, neben dem *Was* getan werden muss, vielmehr auf dem *Wie* etwas getan werden muss.

In der vorliegenden Arbeit wird das Methodikmodell nach Jenke um eine Entkopplung von Prozessen und Methoden aus Gründen der Erweiterbarkeit ergänzt. Zudem erfolgt die Modellierung der Methodik basierend auf dem Modellierungsstandard der Business Process Model and Notation (BPMN). Bild 26 illustriert die Bestandteile der Methodik sowie die in diesem Kapitel genannten Termini in Bezug auf die verwendete Modellierungsnotation.

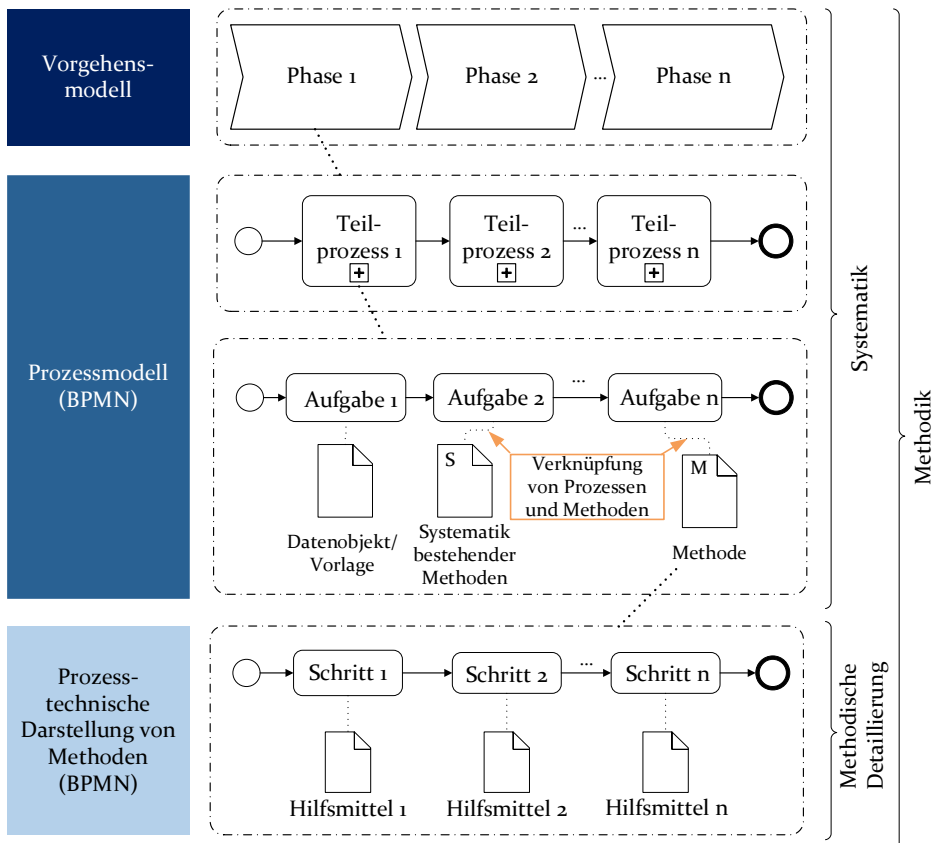


Bild 26: Terminologie bei der Modellierung verschiedener Abstraktionsebenen der Methodik unter Verwendung der BPMN-Modellierungssprache (Business Process Model and Notation)

Auf der obersten Abstraktionsebene erfolgt die Modellierung der Methodik in Form eines Vorgehensmodells, das sich in modulare Phasen gliedert. Modular bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Aktivitäten einer Phase in sich geschlossene Tätigkeiten darstellen und der phasenübergreifende Informationsaustausch über gemeinsame, lose gekoppelte Datenspeicher erfolgt. Die Ergebnisse einer vorgelagerten Phase, auch Ausgaben (engl. Output) genannt, stellen somit jeweils die Eingaben der nachfolgenden Phase dar. Auf der nächsten Abstraktionsebene werden die einzelnen Phasen mittels kaskadierender Prozessmodelle detailliert, die die elementaren und generalisierbaren Vorgänge des Digitalisierungsprozesses strukturieren. Zur Unterstützung von anwenderabhängigen sowie kritischen *Teilprozessen* und *Aufgaben* werden diese mittels *standardisierter Vorlagen* und *neuen Methoden* bzw. *Systematiken zur Methodenauswahl* angereichert. Gleichzeitig bleibt das Modell durch die Entkopplung von Prozessen und Methoden anpassungsfähig und erweiterbar. Losgelöst von den Prozessmodellen der Systematik lassen sich Methoden ebenfalls in einer prozesstechnischen Darstellung abbilden, da diese ebenfalls aus einem systematischen Vorgehen sowie assoziierten Hilfsmitteln (z.B. Modellen, Vorlagen oder Untermethoden) bestehen, vgl. Bild 25.

3.2 Formale Anforderungen an die Methodik

Die Erstellung der Methodik dient der übergeordneten Zielstellung, den Prozess der Digitalisierung in produzierenden Unternehmen effektiver und effizienter zu gestalten. Hierbei definiert der in Kapitel 2.3.4 herausgestellte Handlungsbedarf die inhaltlichen Anforderungen an die Methodik. Ergänzend dazu werden im aktuellen Unterkapitel vier Gütekriterien für die abschließende Evaluierung der Methodik definiert, die der statistischen Testtheorie entlehnt sind [169, 170]. Sie lauten wie folgt:

- **Objektivität:** Unabhängigkeit der Methodik vom anwendenden Personenkreis
- **Validität:** *Empirische* und *formale Richtigkeit* der Methodik vor dem Hintergrund des vorgesehenen *Anwendungskontextes*
- **Utilität:** Nützlichkeit der Methodik in Hinblick auf eine effektivere und effizientere Digitalisierung in Folge einer *aufwandsarmen Anwendbarkeit*
- **Reliabilität:** Verlässlichkeit der Methodik bei mehrmaliger Anwendung, die erwarteten Effektivitäts- und Effizienzgewinne zu erzielen

Die Evaluierung der DMAICS-Methodik erfolgt in Kapitel 5.7.

4 Detaillierung der DMAICS-Methodik

Im aktuellen Kapitel wird der gewählte Lösungsweg für eine effektive und effiziente Digitalisierung in produzierenden Unternehmen erläutert. Dazu werden die fünf Phasen des DMAICS-Zyklus (siehe Bild 24) in je einem der nachfolgenden Unterkapitel beschrieben. Phasenbegleitend werden die zugehörigen Prozesse der Standardize-Schale erläutert, welche die operativen Prozesse der einzelnen Phasen auslösen. Die logische Strukturierung koordinierender und ausführender Aufgaben erfolgt in Form von Prozessmodellen. Zur Wahrung des erweiterbaren Charakters der Methodik ist die methodische Anleitung der Aufgaben von der Prozesslogik entkoppelt (vgl. Bild 26). Die Kompatibilität zwischen Phasenübergängen wird durch die Spezifikation aufeinander abgestimmter Ein- bzw. Ausgaben und die Verwendung einer einheitlichen Taxonomie sichergestellt.

4.1 Define-Phase

Die erste Phase des DMAICS-Zyklus dient zur ganzheitlichen und fortlaufenden Erfassung der Potentiale und Chancen, welche sich durch die Digitalisierung für produzierende Unternehmen ergeben. Hierbei werden die in Kapitel 2.3.4 mit der zugehörigen These 1 in Verbindung gebrachten praktischen Problemmerkmale und Forschungsdefizite wie folgt angesprochen:

- *Prävention und Lösung von Interessenskonflikten* durch die Schaffung von Transparenz und Feedbackmöglichkeiten (PM2.1)
- *Förderung neuer Denk- und Verhaltensweisen* durch standardisierte, asynchron durchführbare Prozesse (PM2.2)
- *Nutzung des verteilten Wissens* durch Einbeziehung aller Mitarbeitenden in den Ideengenerierungsprozess (PM3.1)
- *Systematisierung existierender Methoden* für die Generierung von Digitalisierungsideen (FD1.2)
- *Spezifikation der auszutauschenden Informationen* bei der Erfassung und Verarbeitung von Digitalisierungsideen (FD2.1)

Bild 27 illustriert die Inhalte der Phase und zeigt deren Verknüpfungen zu übergeordneten Prozessen der Standardize-Schale auf.

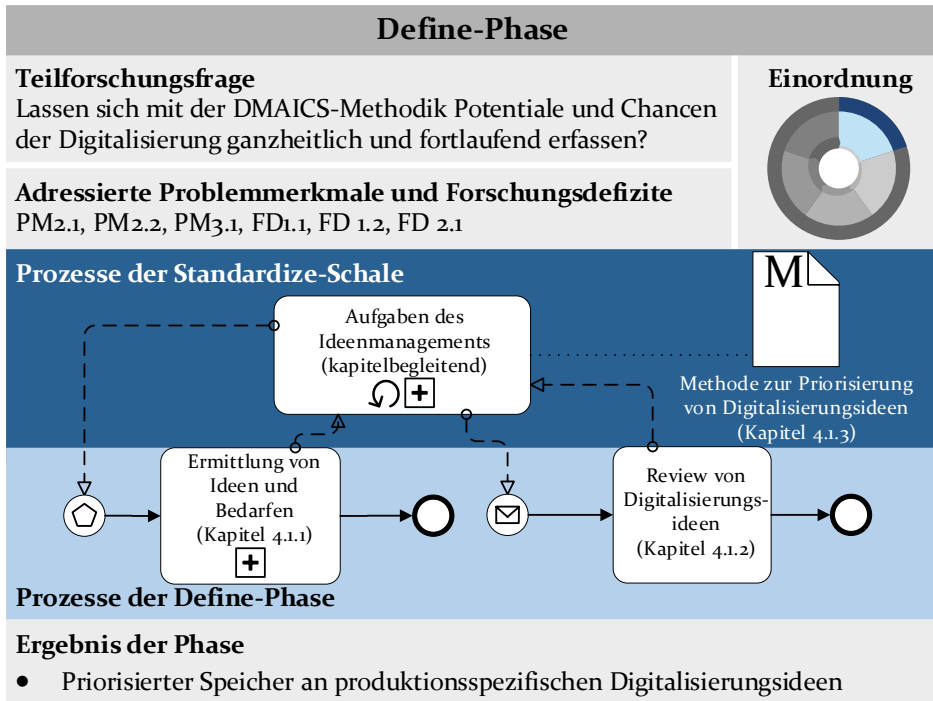


Bild 27: Vorgehen und Inhalt der Define-Phase

Die Define-Phase umfasst zum einen den Teilprozess der Ideengenerierung (vgl. Kapitel 4.1.1), zum anderen einen Prozess zum Review der Ideen (vgl. Kapitel 4.1.2). Koordiniert werden diese Vorgänge durch ein übergeordnetes Ideenmanagement, das kapitelbegleitend erläutert wird. Zu den Tätigkeiten des Ideenmanagements gehört weiterhin die Aufgabe der Ideenpriorisierung. In Kapitel 4.1.3 wird eine neue Methode zur systematischen Priorisierung von Digitalisierungsideen vorgestellt. Das Ergebnis der Define-Phase ist ein produktionsspezifischer und priorisierter Speicher von Digitalisierungsideen, der die Potentiale und Chancen der Digitalisierung ganzheitlich abbildet. Abschließend wird ein Zwischenfazit in Kapitel 4.1.4 gegeben.

4.1.1 Generierung von Innovationsideen und Bedarfsermittlung der Digitalisierung im Produktionsbereich

Der Ausgangspunkt für die Digitalisierung sind *Ideen*, welche im Folgenden auch *Digitalisierungsideen* genannt werden. Die wichtigste Ressource zur Ideengenerierung stellen die Mitarbeitenden des Unternehmens dar, welche zur ganzheitlichen Erfassung von Digitalisierungsideen in den Prozess

einzu beziehen sind. Dieser Prozess kann aktiv durch zyklische Aufforderungen, Anreizsysteme oder Ereignisse stimuliert bzw. ausgelöst werden. Ggf. ist die Zuhilfenahme externer Beratungs- oder Schulungsdienstleistungen bei der Ideengenerierung durch Bezug von externen Knowhows gewinnbringend. Die Verantwortung für eine aktive Förderung der Innovationskultur tragen die Führungskräfte und das Innovationsmanagement (vgl. Kapitel 2.1.5), das den abteilungsübergreifenden Ideenaustausch organisiert und Ideen mittels eines Ideenmanagementsystems verwaltet (vgl. Bild 28).

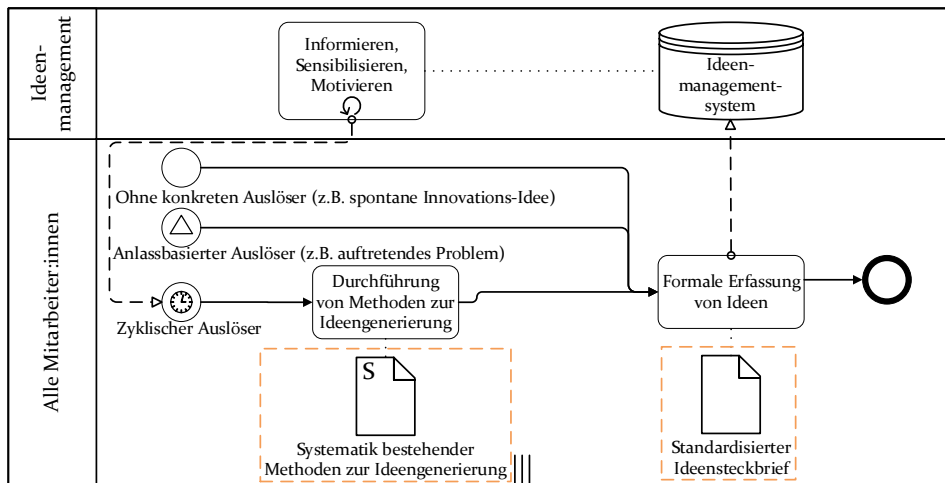


Bild 28: Prozessmodell der Ideengenerierung in Unternehmen zur Einordnung der Kapitelinhalte

Der Teilprozess der Ideengenerierung gliedert sich in zwei Unteraufgaben. Erstens die Ideengenerierung und zweitens die formale Erfassung von Ideen. Um den adäquaten Methodeneinsatz bei der Ideengenerierung zu stärken, werden bestehende Ideengenerierungs-Methoden systematisiert. Zur Standardisierung der Erfassung von Ideen wird ein digitaler Ideensteckbrief vorgestellt, der die anschließende Weiterverarbeitung der gesammelten Digitalisierungsideen erleichtert.

Systematisierung bestehender Ansätze zur Ideengenerierung

In der Literatur existiert eine Mannigfaltigkeit an Methoden zur Ideengenerierung im Kontext der Digitalisierung. Basierend auf einer systematischen Literaturanalyse wurden die relevantesten Methoden und Werkzeuge gesammelt und insgesamt zehn Kategorien identifiziert. Diese werden in Bild 29 zur Erleichterung der Methodenauswahl nach der treibenden Kraft (*Technology-Push* bzw. *Demand-Pull*) und ihrer Wirkrichtung

(*Top-Down, Middle-Up-Down, Bottom-Up*) in eine sechs Felder-Matrix schematisch eingeordnet. Methodenkategorien, die vornehmlich durch den Technologie-Push-angeregt werden, überprüfen die Übertragbarkeit technischer Lösungen auf neue Anwendungsfälle. Für die strategische bis taktische Ideengenerierung eignen sich *Innovationsworkshops*, *I4.0-Assessments* sowie *Reifegrad- und Unternehmensanalysen*. Für die taktische bis operative Ideengenerierung ist neben den bereits genannten *Innovationsworkshops* zusätzlich die Analyse des Status-Quo mittels sog. *I4.0-Checklisten* geeignet.

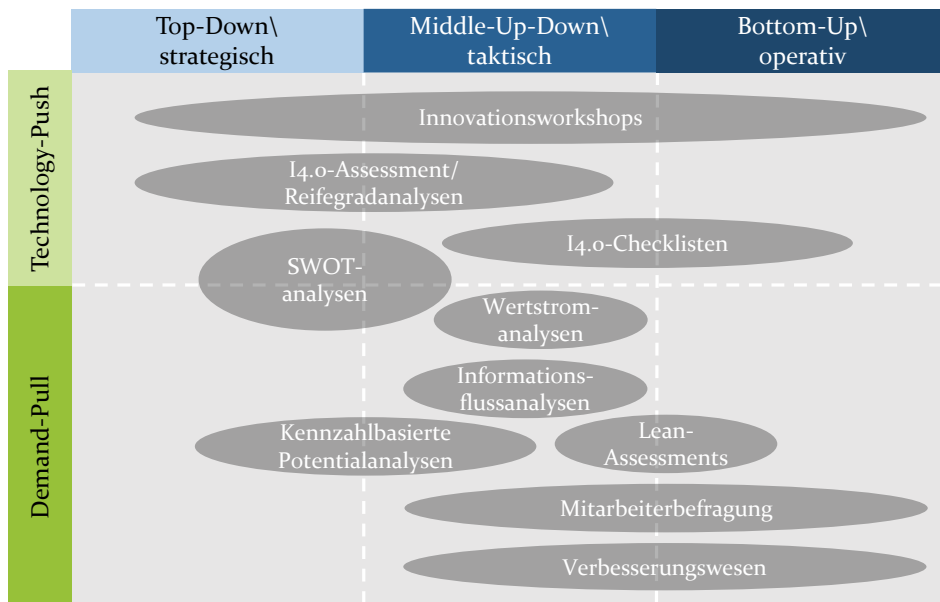


Bild 29: Systematisierung von Methoden- und Werkzeugtypen zur Entwicklung von Digitalisierungsideen nach Wirkrichtung und treibender Kraft

Methoden der bedarfsgetriebenen Ideengenerierung (Demand-Pull) priorisieren Verbesserungspotentiale vor der technischen Lösungsfindung. Auf strategischer und taktischer Ebene sind *kennzahlbasierte Potentialanalysen* das adäquate Mittel. Taktische Methodenkategorien stellen *Wertstrom- und Informationsflussanalysen* dar. Auf der taktischen bis operativen Ebene sind sog. *Lean-Assessments, Mitarbeiterbefragungen* und *Methoden des kontinuierlichen Verbesserungswesens* einzusetzen.

In Tabelle 3 werden den genannten Kategorien zugehörige Methoden und Hilfsmittel zur vertiefenden Schulung und Anwendung zugeordnet.

Tabelle 3: Überblick relevanter Methoden und Hilfsmittel zur Erfassung von Digitalisierungspotentialen aus der Literatur

Überbegriff	Methoden & Hilfsmittel
Kennzahlbasierte Potentialanalyse	<ul style="list-style-type: none"> Balanced Scorecard [112] Leitbild des Objectives and Key Results (OKR) [171]
Prozessanalyse	<ul style="list-style-type: none"> Wertstromanalyse [172] Informationsflussanalyse [172]
Strategische Unternehmensanalyse	<ul style="list-style-type: none"> Branchenstrukturanalyse (z.B. Porter's Five Forces) [173] Umfeldanalyse (z.B. PESTEL-Analyse) [174] SWOT-Analyse [175]
I4.0-Assessment	<ul style="list-style-type: none"> Reifegradmodelle [162, 176, 154] Checklisten [177, 178] Benchmarking [179] Technologieradar [180, 181]
Lean-Assessment	<ul style="list-style-type: none"> Assessment-Werkzeuge und Frameworks [182]
Mitarbeiterbefragung	<ul style="list-style-type: none"> Fragebögen [183]
Task-Processmining	<ul style="list-style-type: none"> Softwaretools [184]
Innovationsworkshop	<ul style="list-style-type: none"> World Café [185] Open Space [186] Design-Thinking [187]
Vorschlags- und Verbesserungswesen	<ul style="list-style-type: none"> Kontinuierlicher Verbesserungsprozess [188]

Standardisierter Ideensteckbrief

Die Vereinheitlichung der Erfassung von Ideen dient der Befähigung der effizienten Weiterverarbeitung durch nachgelagerte Prozesse. Der Entwicklung des Ideensteckbriefs liegen die in Tabelle 4 dargestellten Anforderungen zugrunde.

Tabelle 4: Anforderungen nachgelagerter Prozesse an die Erfassung von Digitalisierungsideen

Nachgelagerter Prozess	Anforderung
Konsolidierung	Einordnung der Idee in den Unternehmenskontext zur Identifikation von Redundanzen und Synergien
Review	Befähigung zur systematischen Diskussion des Reifegrads der Idee
Priorisierung	Multikriterielle Differenzierung der Ideenqualität
Effektivitätsmessung/ Belohnung	Zuordnung der Idee auf die Ideengehenden

Um die Anforderung nach einer Differenzierbarkeit von Ideen zu erfüllen, baut die entwickelte Lösung auf der systemischen Aufschlüsselung des Ideenbegriffs nach Fischer auf. Nach diesem Modell ist eine Idee ein

Dreigestirn aus den Sinneinheiten *Anlass*, *Wert* und *Lösung* [189]. Der *Anlass* bezeichnet hierbei eine neue Aufgabe oder ein Problem. Der *Wert* entspricht dem *Nutzen*, der durch die Umsetzung der *Lösung* eintritt. Die Abwesenheit bzw. fehlende Konkretisierung einer dieser Sinneinheiten beeinträchtigt die Sinnhaftigkeit, die Nachvollziehbarkeit, die Umsetzbarkeit und somit die Gesamtqualität einer Idee. Wie in Bild 30 dargestellt, lassen sich verschiedene Zustände des Ideengenerierungsprozesses in Abhängigkeit der Ausprägung systemisch aufschlüsseln.

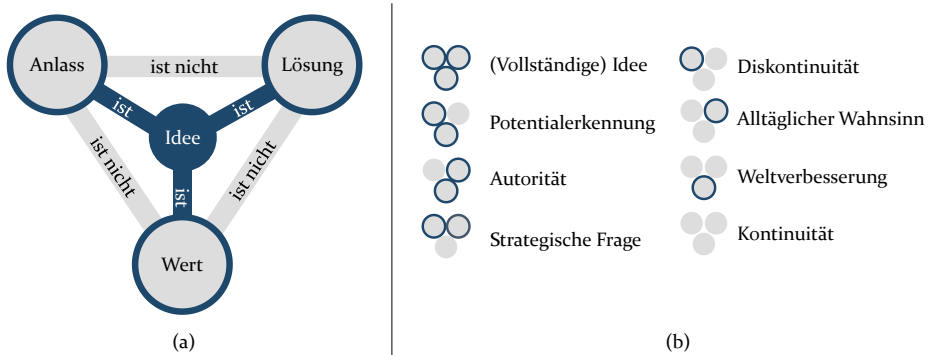


Bild 30: Systemische Aufschlüsselung der Zustände des Ideengenerierungsprozesses mittels des Ideenmodells von Fischer [189]

Die vollständige Idee und die Kontinuität stellen vollendete Zustände des Ideengenerierungsprozesses dar. Ersterer bedeutet „die verständliche, diskutierbare und umsetzbare Idee [...] [als] eine logische Einheit von Anlass, Lösung und Wert“ [189]. Letzterer Zustand ist äquivalent zu: Wenn „[d]ie Bedürfnislage [...] befriedigt [scheint] [...] und der Zustand [...] durchgehend optimal ist“, ist der letztere Zustand erreicht. Dies kann aber auch bedeuten, dass Probleme oder Herausforderungen nicht erkannt werden [189]. Alle weiteren Zustände der Aufschlüsselung sind mögliche Zwischenzustände des Ideenentwicklungsprozesses. Der Zustand der Potentialerkennung beinhaltet Bedarfe, denen ein Anlass und ein Wert zugrunde liegt, bei dem jedoch die Klarheit der Beschaffenheit der Lösung fehlt. Dieser Zustand tritt insbesondere bei der Durchführung von Demand-Pull-Methoden (vgl. Bild 29) auf. Der Zustand der *Autorität* bedeutet, dass einer technischen Lösung ein Wert zugemessen wird. Dennoch wird der Anlass nicht bekannt gegeben, sodass Mitarbeitenden „blinde Gefolgschaft“ statt Erkenntnis abverlangt wird. Ist die Lösung zum bestehenden Anlass bekannt, jedoch der effektive Wert nicht rein subjektiv (quantitativ) bestimmbar, so wäre die Entscheidung der Umsetzung einer Idee dieses Zustands als *strategische Frage* zu beantworten. Im Zustand der Diskontinuität existieren Anlässe zur Veränderung des Status quo, doch ist weder der

Wert des Zielzustands noch die Lösung absehbar. Ist eine Lösung, jedoch weder Wert noch Anlass definiert, so ist eine Idee dieses Zustandes aus unternehmerischer Sicht nicht rational zu begründen. Ebenso widerspricht das idealistische Verfolgen von Ideen, denen eine Wertvorstellung zugrunde liegt jedoch ohne Kenntnis eines Anlasses und einer Lösung einem unternehmerischen Vorgehen.

Zur Förderung der effizienten Diskussion von Ideen, werden die Bestandteile der systemischen Aufschlüsselung separat erfasst und mit einer Reifegradbewertung versehen. Darüber hinaus wird der in Bild 31 dargestellte Ideensteckbrief mit Metainformationen zur Zuordenbarkeit und systematischen Einordnung von Ideen in den Unternehmenskontext angereichert.

Die in Bild 31 dargestellten Metainformationen ermöglichen eine personelle sowie zeitliche Zuordnung der Ideen. Weiterhin lassen sich durch die Dokumentation der Art der Idee und der Erfassungsmethoden deren Effektivitäten rückwirkend bestimmen. Die Einordnung der Idee in den Unternehmenskontext erfolgt anhand des Betrachtungsgegenstands der Idee. Dieser kann basierend auf dem PPR-Modell für das Produktionsumfeld ganzheitlich betrachtet werden. Dadurch lässt sich die Idee einer der Kategorien *Produkt*, *Prozess* oder *Ressource* zuordnen. Ferner lassen sich diese Kategorien durch Verwendung, meist unternehmensspezifischer Systematiken, wie folgt weiter systematisieren:

- Produkt: Produktstruktur, wie Produktfamilie, Produktvariante, Baugruppe, Teilenummer
- Prozess: Prozessstruktur, wie Geschäftsprozess, Managementprozess, Kernprozess, Unterstützungsprozess
- Ressource: Hierarchieebene nach ISA-95, Unternehmen, Standort, Bereich, Anlage, Arbeitsstation

Dies beugt Missverständnisse bei der Diskussion des Ideenumfanges vor und erleichtert die Identifikation verwandter Ideen bei der Konsolidierung. Über die Angabe einzubindender Stakeholder, lassen sich relevante Reviewer:innen spezifizieren. Stärken und Schwächen der einzelnen Ideenbestandteile werden anhand standardisierter Reifegradmodelle effizient kommuniziert. Der Anlass, also die Aufgaben- bzw. Problembeschreibung wird hierbei hinsichtlich der Art der Spezifikation bzw. der Evidenz bewertet [190]. Der Wert der Idee wird durch eine Bewertung der Zielgrößen mittels der SMART-Kriterien nach Drucker formuliert, die in der Praxis bereits einen De-Facto-Standard für die Zieldefinition darstellen. Der Reifegrad von Lösungen lässt sich in Anlehnung an die Definition des technologischen Reifegrads der NASA in 9 Stufen bewerten [191]. Die digitale

Ausgestaltung des Ideensteckbriefs ermöglicht weiterhin die zusätzliche Verlinkung und Dokumentation relevanter Artefakte, wie etwa Nachweise, Belege oder weiterführende Informationen.

« Zurück
Ideen-Steckbrief
Abschicken

Metainformationen

Datum: <input type="text" value="TT.MM.JJJJ"/>	Kategorie: <input type="checkbox"/> Produkt <input checked="" type="checkbox"/> Prozess <input checked="" type="checkbox"/> Ressource <input type="checkbox"/> Sonstiges
Autor:innen: <input type="text" value="Vorname, Nachname"/> +	Hierarchieebene: <input type="checkbox"/> Unternehmen <input type="checkbox"/> Standort <input type="checkbox"/> Bereich <input checked="" type="checkbox"/> Anlage <input type="checkbox"/> Arbeitsstation
Methode: <input type="text" value="SWOT-Analyse"/> <input type="text" value="Link zur Dokumentatio"/> +	Bezeichnung: <input type="text" value="ID des Betroffenen Objekts"/> +
Ideen-Titel: <input type="text" value="Bezeichnung"/>	Einzubindende Stakeholder: <input type="text" value="Funktionsbereiche"/> +
Art: <input type="checkbox"/> Strategisch <input checked="" type="checkbox"/> Taktisch <input type="checkbox"/> Operativ	

Anlass

<input style="width: 95%; height: 40px;" type="text" value="Aufgaben- und/oder Problembeschreibung"/>	Art der Spezifikation/ Evidenz: <input type="checkbox"/> Anekdotisch <input type="checkbox"/> Qualitativ <input checked="" type="checkbox"/> Quantitativ <input type="text" value="Link zur Dokumentation"/> +
---	--

Wert

<input style="width: 95%; height: 40px;" type="text" value="Beschreibung"/>	SMART-Kriterien: <input type="checkbox"/> Spezifisch <input checked="" type="checkbox"/> Messbar <input checked="" type="checkbox"/> Attraktiv <input checked="" type="checkbox"/> Realistisch <input type="checkbox"/> Terminiert <input type="text" value="Link zur Dokumentation"/> +
---	---

Lösung

<input style="width: 95%; height: 40px;" type="text" value="Beschreibung des Lösungskonzeptes"/>	Technologischer Reifegrad: <input type="text" value="TLR 6: Prototyp in Einsatzumgebung"/> <input type="text" value="Link zur Dokumentation"/> +
--	--

Bild 31: Steckbrief zur standardisierten Erfassung von Digitalisierungsideen

4.1.2 Begutachtung und Anreicherung von Digitalisierungsideen durch Mehrpersonenbefragungen

Eine fachliche sowie strategische Begutachtung und Anreicherung von Digitalisierungsideen mehrerer Stakeholdergruppen wird durch die folgenden Gründe motiviert:

- Steigerung der Identifikation mit dem Thema der Digitalisierungsidee durch frühzeitige Einbindung potentieller Stakeholder [192]
- Prüfung der Übertragbarkeit zur Nutzung von Skaleneffekten
- frühzeitige Identifikation und Auflösung von Interessens- und Ideenkonflikten
- Nutzung des gemeinschaftlichen Wissens zur Risikobewertung

Diesen Vorteilen stehen die Aufwände der Begutachtung selbst gegenüber. Um diese so gering wie möglich zu halten, wird dieser Aufgabe ein Konsolidierungsschritt vorangestellt, der die Menge der zu begutachtenden Ideen reduziert. Dieser Prozessschritt ist durch eine übergeordnete Funktion, bspw. ein zentrales Ideenmanagement, zu realisieren und stellt somit eine Aufgabe der Standardize-Schale dar. Eine weitere Aufgabe dieser koordinierenden Instanz ist die Festlegung und Information aller relevanten Reviewer.

Um eine effiziente Durchführung der Begutachtung und Ideenreicherung für die ernannten Personen zu ermöglichen, wurde ein auf den Ideensteckbrief abgestimmter Begutachtungsbogen entworfen. Nach Abschluss der Begutachtung werden die Ergebnisse in einem gemeinsamen Speicher zur Konsolidierung gesammelt. Die Koordination der Mehrpersonenbefragungen zur Ideenbegutachtung ist in Bild 32 dargestellt.

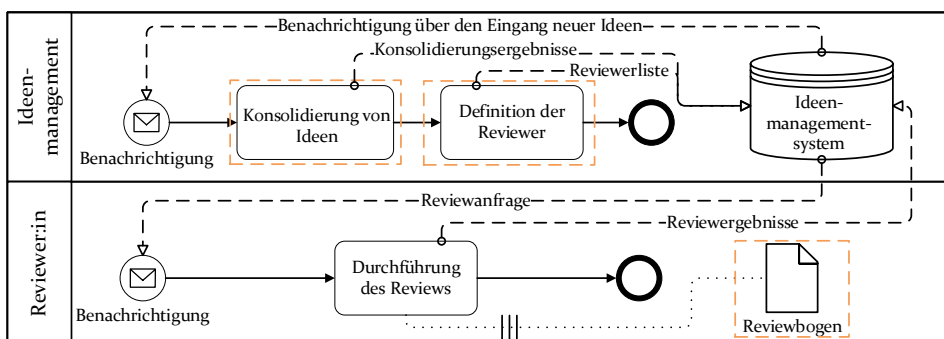


Bild 32: Prozessmodell zum effizienten Mehrpersonenreview von Ideen mit Einordnung der Kapitelinhalte

Konsolidierung von Digitalisierungsideen

Die Zielsetzung der Konsolidierungsaufgabe ist die Reduktion der Begutachtungsaufwände durch die Eliminierung von Redundanzen und das Verbinden zusammengehöriger Ideen. Der Prozess der Konsolidierung erfordert fachliche, kreative und kognitive Fähigkeiten, um komplexe Zusammenhänge in der Menge an Ideen zu erkennen. Zur Unterstützung dieser Aufgabe werden in Bild 33 neben der manuellen Durchführung auch Konzepte zur softwaregestützten Durchführung aufgezeigt.

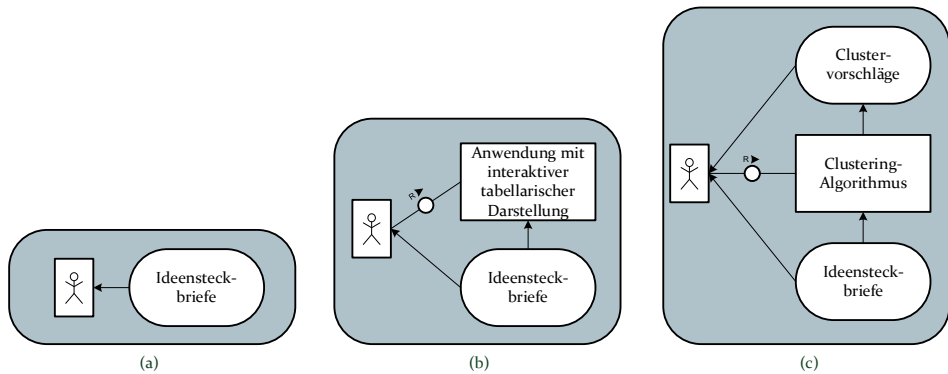


Bild 33: Systemarchitekturen zum Clustering von Ideen: Manuelles System (a), System mit Softwareunterstützung mittels interaktiven Tabellen (b), System mit Softwareunterstützung mittels Clustering-Algorithmus (c)

Das manuelle System (a) erfordert, dass der Mensch eine ggf. große Anzahl an Ideen ordnet und verarbeitet, um letztlich möglichst alle Ideencluster zu identifizieren und deren Inhalte zu konsolidieren. Im System (b) wird dieser Prozess durch eine tabellarische Darstellung der Metainformationen des Ideensteckbriefs unterstützt. Mittels interaktiver Tabellen kann der Mitarbeitende die Ideen anhand der verfügbaren Metainformationen (Anlage, Prozess, Produkt etc.) sortieren und filtern. Dadurch lässt sich der Suchraum für die Identifikation von Ideencluster gezielt einschränken. In System (c) werden Vorschläge für Ideencluster durch einen Algorithmus unter Verwendung dieser Metainformationen identifiziert. Diese konkreten Clustervorschläge werden anschließend, nach erfolgreicher Prüfung durch den Anwendenden, zusammengefasst. Als Beispiel für einen geeigneten Clusteralgorithmus ist der CLICKS-Algorithmus für kategorische Datensätze nach Zaki et al. zu nennen [193]. In Abgrenzung zu anderen Clustering-Algorithmen berücksichtigt dieser Algorithmus auch Cluster in Unterräumen (Subspaces). Aus dem Speicher von Ideensteckbriefen lassen sich die Metainformationen extrahieren und in eine tabellarische Form überführen. In Abhängigkeit des Sensitivitätsfaktors α werden, basierend

auf den multivariaten Eingangsdaten, Cluster gebildet. Durch sukzessives Herabsetzen des Faktors wird der k-teilige Graph in Bild 34 um weitere (hier: dünn dargestellte) Verbindungen erweitert, bis schließlich jeder Wert und damit auch jeder Eintrag des Datensatzes einem Cluster zugehörig ist. Auf diese Weise kann eine deterministische Cluster-Hierarchie gebildet werden [193].

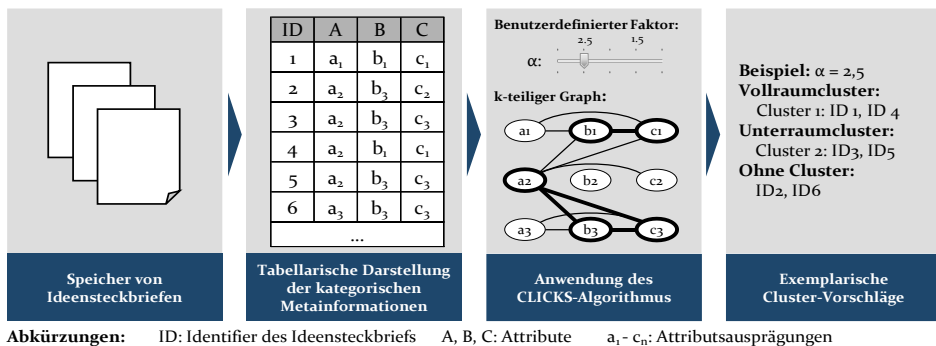


Bild 34: Automatisierte Generierung von Ideencluster-Vorschlägen mittels des CLICKS-Algorithmus i.A.a. [193]

Identifikation und Information der Reviewer

Der Einbezug aller relevanten Stakeholder in die Ideenbegutachtung stellt eine praktisch einfache jedoch ebenso sehr wichtige Aufgabe dar. Das Ergebnis der Begutachtung kann durch die Vernachlässigung einzelner Anspruchsgruppen und Wissensträger:innen von der bestmöglichen gemeinschaftlichen Urteilsbildung drastisch abweichen. Die in Tabelle 5 dargestellte Checkliste ist daher bei der Auswahl der potenziellen Reviewer von Digitalisierungsideen sorgfältig zu prüfen.

Tabelle 5: Checkliste zur Einbindung potenzieller Reviewer von Digitalisierungsideen

Stakeholder	Grund
Führungskräfte betroffener Funktionsbereiche (z.B. Qualität, Logistik, Produktion)	(Bereichs-)Strategiekonformität, Fachwissen, Erfahrung, Überblick
Vertreter strategischer und taktischer Funktionen der technischen Betreuung potenzieller zukünftiger Lösungen (z.B. IT, OT)	Bewertung bzgl. Strategiekonformität, Integrations- und Betriebsfähigkeit der Lösung
Intellectual Property-Management (IP)	Prüfung potenzieller Schutzrechte
Anwender:innen	Frühzeitiger Einbezug, Detailwissen
Prozess-, Asset-Verantwortliche	Detailwissen
Engineering-/Digitalisierungs-Community	Nutzung des kollektiven Fachwissens

Begutachtung und Anreicherung von Ideen

Die Begutachtung und Anreicherung von Ideen folgt der Struktur des in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Ideensteckbriefs. Mittels einer Liste von Kontrollfragen wird die Vollständigkeit der Begutachtung und die Berücksichtigung verschiedener Gesichtspunkte der Anreicherung sichergestellt.

Die Essenz guter Reviews fasst McPeck in der Goldenen Regel der Begutachtung zusammen: "Review for others as you would have others review for you" [194]. Gute Eigenschaften von Bewertungen lassen sich mit den Charakteristiken der *konstruktiven*, *hilfsbereiten* und *klaren* Kritik zusammenfassen [195]. Weiterhin ist die Kritik nachvollziehbar unter Angabe von Gründen zu äußern. Bewertungsaspekte, die sich dem Kenntnisstand des Gutachtenden entziehen, sind mit „keine Aussage möglich“ zu kennzeichnen.

Als Leitfaden für die Begutachtung von Digitalisierungsideen i.A.a. den wissenschaftlichen Peer-Review-Prozess [195] zielt die Begutachtung von Digitalisierungsideen auf die folgenden beiden Aspekte ab:

1. Vermeidung von schlechten Ideen, die Mehrarbeit nach sich ziehen
2. Überprüfung, ob die Ideenformulierung unmissverständlich und korrekt ist

Dazu werden schlechte Ideen durch Angabe etwaiger Schwachstellen, Risiken und K.o.-Kriterien gekennzeichnet. Die Klarheit der Ideenformulierung wird mit folgenden drei Kontrollfragen definiert:

- Ist der *Anlass* konkret, nachvollziehbar und erwiesen?
- Werden Zielgrößen des *Werts* plausibel und vollständig berücksichtigt?
- Ist eine technische sowie wirtschaftliche Machbarkeit der *Lösung* absehbar?

Weiterhin dient die Mehrpersonenbefragung der Verbesserung der Ideenqualität durch Anreicherung folgender Aspekte:

- Prüfung der Erweiterung oder Eingrenzung des Ideenumfangs
- Erweiterung des Reviewerkreises
- Bestärken, Ergänzen von Informationen und Argumenten durch Hinzufügen von Verweisen (*Wert*, *Anlass*)
- Äußerung von Bedenken und erkannten Risiken
- Ergänzung von alternativen Lösungsvorschlägen

Zur asynchronen Durchführung der Ideen-Begutachtung und -Anreicherung wird die Integration der genannten Aspekte in das jeweilige Ideenmanagementsystem des Unternehmens empfohlen. Weiterhin sind die im Rahmen der Begutachtung erhobenen und ggf. widersprüchlichen Informationen mittels Methoden der Konsensbildung gemeinschaftlich zu konsolidieren (vgl. Kapitel 2.1.5).

4.1.3 Priorisierung von Digitalisierungsideen

Um eine zielgerichtete Bearbeitungsreihenfolge der begutachteten und angereicherten Digitalisierungsideen festzulegen, sind diese gegeneinander zu priorisieren. Im Wesentlichen werden dabei drei Ziele verfolgt:

- Vorfilterung der Ideen
- Erstellung eines Ideenspeichers für die Umsetzungsplanung
- Nachvollziehbare Weiterverfolgung der Digitalisierungsideen zur Erhöhung der Akzeptanz aller Stakeholder

Bei der Priorisierung von Digitalisierungsideen stellen sich folgende Herausforderungen:

- Gewährleistung der Typgleichheit der zu vergleichenden Entitäten (z.B. strategische vs. operative Ideen, konkrete vs. unkonkrete Ideen, Bedarfe vs. Lösungen)
- Effiziente Priorisierung nur qualitativ möglich und durch subjektive Einschätzungen geprägt

Zielgerichtet und unter Berücksichtigung der Herausforderungen, ergeben sich folgende Anforderungen und Lösungen an den Priorisierungsprozess:

- Aus Effizienzgründen ist die Priorisierung „nicht so exakt wie möglich, sondern nur so genau wie nötig“ durchzuführen [196]
Lösung: Mehrstufiger Ansatz
- Sicherstellung der Kompatibilität mit unterschiedlichen Ideenarten
Lösung: Ganzheitlicher Ansatz
- Subjektive Bewertungs- und Entscheidungsfindungsprozesse sind Nährboden für Interessenskonflikte
Lösung: Subjektive Einschätzungen sind gemeinschaftlich von Vertreter:innen verschiedener Stakeholdergruppen im Rahmen einer Konsens- bzw. Kompromissfindung durchzuführen

Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen gliedert die entwickelte Methode den Priorisierungsprozess in drei Detailstufen, die eine ganzheitliche Betrachtung gewährleisten (vgl. Bild 35).

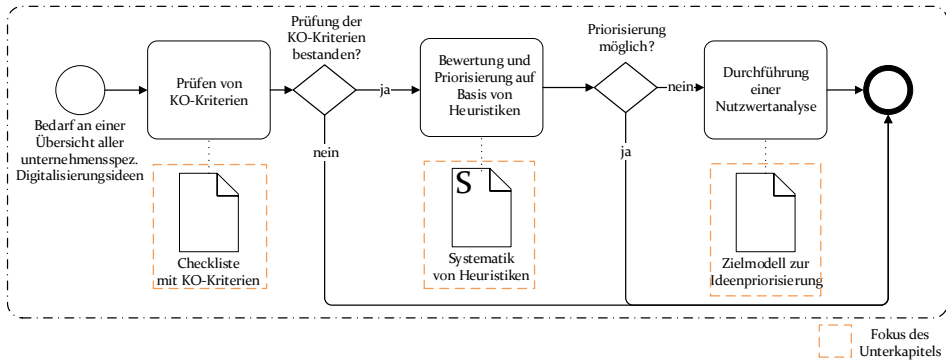


Bild 35: Methode zur Priorisierung von Digitalisierungsideen

Im ersten Schritt der Priorisierungsmethode werden Ideen unter Zuhilfenahme einer *Checkliste* auf mögliche K.o.-Kriterien geprüft. Dies beugt vermeidbaren Bewertungsaufwänden vor. Im nächsten Schritt werden die Ideen aus dem Ideenspeicher mittels *Heuristiken* effizient bewertet und anschließend in eine Priorisierungsreihenfolge gebracht. Ist eine eindeutige Priorisierung anhand von Heuristiken nicht möglich, kann im Bedarfsfall eine detailliertere Bewertung kraft einer *Nutzwertanalyse* erfolgen. Dafür wurde ein Zielmodell zur Ideenpriorisierung entwickelt, von dem sich die Bewertungskriterien der Nutzwertanalyse unter Wahrung der Vollständigkeit der Betrachtung ableiten lassen.

Im Folgenden werden die für die Methode benötigten Hilfsmittel detailliert. Dazu gehören: *Checkliste mit K.o.-Kriterien*, *Übersicht von Bewertungsheuristiken* und das *Zielmodell zur Ideenbewertung*. Die Anwendung dieser drei Werkzeuge kann mit Methoden der Konsensbildung (z.B. Delphi-Methode, PERT-Methode, vgl. Kapitel 2.1.5) kombiniert werden, um systematische Mehrpersonenentscheidungen zu fällen.

K.o.-Kriterien bei der Ideenbewertung

Ausgehend von den von Winter et al. zusammengetragenen Bewertungskriterien für Innovationen (vgl. [197]), wurden fünf Arten von K.o.-Kriterien für die Ideenbewertung identifiziert und ein sechstes sog. formales K.o.-Kriterium ergänzt. Tabelle 6 ordnet den K.o.-Kriterien zur Veranschaulichung je eine exemplarische Ausprägung zu.

Tabelle 6: Checkliste von K.o.-Kriterien zur Bewertung von Digitalisierungsideen

Art des K.o.-Kriteriums	Beispiel
Technisch	Technische Realisierbarkeit nicht machbar
Zeitlich	Entwicklungs- und Umsetzungsdauer in Hinblick auf den spezifizierten Anlass nicht zielführend
Wirtschaftlich	Antizipiertes Aufwand-Nutzen-Verhältnis unter dem unternehmensspezifischen Mindestanspruchsniveau
Unternehmensbezogen	Komplementarität mit den Unternehmensgrundsätzen nicht gegeben
Juristisch	Übereinstimmung mit den gesetzlichen Rahmenbedingungen und Richtlinien nicht gegeben (z.B. Verstoß gegen die Datenschutz-Grundverordnung)
Formal	Keine ausreichende Konkretisierung der Ideenbeschreibung im Rahmen des Begutachtungsprozesses (vgl. Kapitel 4.1.2) möglich

Heuristiken zur Ideenbewertung

In Anbetracht komplexer Entscheidungssituationen stellen Heuristiken ein pragmatisches Werkzeug zur Bewertung und Abwägung dar [198]. Für die Bewertung von Ideen existieren verschiedene Heuristiken, mit denen sich Ideen effizient evaluieren lassen (siehe Bild 36).

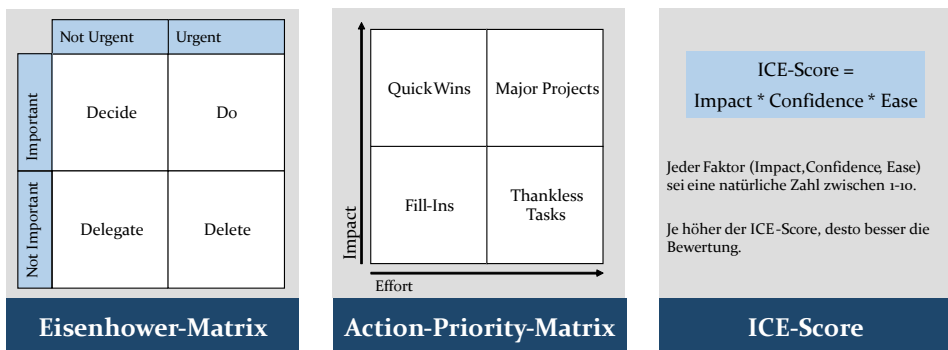


Bild 36: Heuristiken zur Bewertung von Ideen [199–201]

Die aus dem Krisenmanagement bekannte Eisenhower-Methode priorisiert Ideen nach *Dringlichkeit* und *Wichtigkeit des Anlasses* [199]. Mögliche Opportunitätskosten, welche durch ein Verschieben potentialreicherer Digitalisierungsideen entstehen, werden hierbei vernachlässigt. Eine Priorisierung nach Wirtschaftlichkeit ist mittels der Action-Priority-Matrix möglich. Hierbei werden Ideen nach Aufwand (*Effort*) und Nutzen (*Impact*) in vier Kategorien eingeteilt [200]. Jedoch werden Unsicherheiten in der Action-Priority-Matrix nicht abgebildet. Unter Verwendung des von Sean

Ellis definierten ICE-Score werden Unsicherheiten des Nutzens (*Impact*) im Faktor „*Confidence*“ berücksichtigt. Darüber hinaus werden Umsetzungsaufwände mittels des Faktors „*Ease*“ ausgedrückt [201].

Die gezeigten Heuristiken weisen ein hohes Abstraktionsniveau auf. Dies ist einerseits für die effiziente Durchführung der Bewertung in komplexen Bewertungssituationen erforderlich. Andererseits erschwert die starke Vereinfachung der zugrundeliegenden Themenkomplexe eine objektive Diskussion, da bspw. strategische Beweggründe nur implizit zum Tragen kommen. Des Weiteren fehlt eine Übersetzung der Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Metriken. Dieses Defizit wird im nachfolgenden Zielmodell zur Ideenbewertung adressiert.

Zielmodell zur Ideenbewertung

Das entwickelte Zielmodell zur Ideenbewertung dient der ganzheitlichen Aufschlüsselung von Bewertungskriterien von Digitalisierungsideen. Dazu werden in Bild 37 die drei Grundbestandteile von Ideen zueinander sowie mit den Zielgrößen der *Effektivität* und die *Effizienz*, in Relation gesetzt.

Zielmodell der effektiven und effizienten Digitalisierung

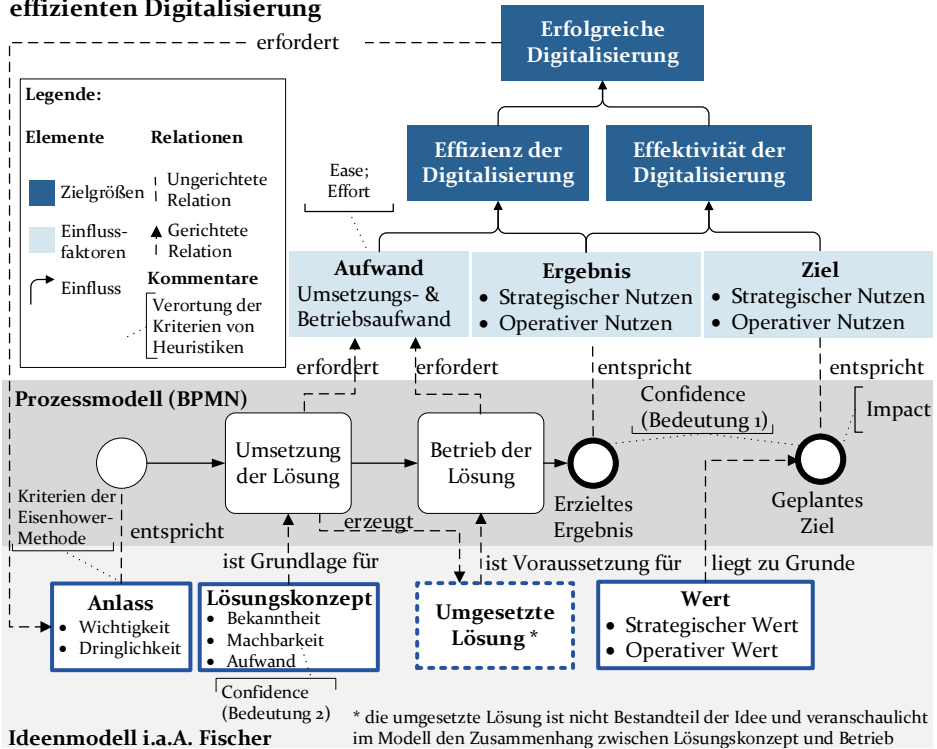


Bild 37: Zielmodell zur Bewertung und Priorisierung von Digitalisierungsideen

Das Zielmodell zur Priorisierung von Digitalisierungsideen stellt einen Bezug zwischen den Ideenbestandteilen nach Fischer, dem vereinfacht dargestellten Lebenszyklusprozess und den Zielgrößen der effektiven und effizienten Digitalisierung her, die in Kombination eine erfolgreiche Digitalisierung charakterisieren. Die Zuordnung der Einflussfaktoren Aufwand und Ergebnis auf die Effizienz sowie der Einflussfaktoren Ergebnis und Ziel auf die Effektivität, entsprechen der jeweiligen Begriffsdefinition nach Drucker (vgl. Kapitel 2.1.1). Die Kriterien der zuvor genannten Bewertungsheuristiken lassen sich vollständig in das Modell einordnen. Die Kriterien der Eisenhower-Methode finden sich in der Beschreibung des Anlasses wieder. Das Kriterium *Effort* der Action-Priority-Matrix bzw. das Kriterium *Ease* des ICE-Scores drücken den Aufwand aus, der sich aus den Umsetzungs- und den Betriebsaufwänden zusammensetzt. Das Kriterium *Impact* ist in diesem Modell mit dem geplanten Soll-Zustand bzw. geplanten Ziel, gleichgesetzt, dem der Wert der Idee zugrunde liegt. Das Kriterium *Confidence* kann auf zwei Arten interpretiert werden: Entweder mit welcher Sicherheit das erzielte Ergebnis dem geplanten Nutzen des Zieles entspricht, oder wie sicher ein Lösungskonzept mit den geplanten Aufwänden realisiert werden kann. Mittels des Modells, das alle drei Heuristiken in eine gemeinsame Sprache überführt, lassen sich derartige Missverständnisse gezielt erörtern. Das Modell stellt logische Wirkmechanismen zwischen Ideen und deren Einfluss auf die Effektivität sowie Effizienz der Digitalisierung dar. Stärken und Schwächen von Ideen, lassen sich unter Verwendung einer einheitlichen Sprache effizient eruieren. Weiterhin eignet sich das Modell als konsistente Ausgangsbasis für die ganzheitliche Ableitung von Kriterien für Nutzwertanalysen.

4.1.4 Zwischenfazit zur Define-Phase

Das Prozessmodell in Bild 27 verbindet die ausführenden Aufgaben der Define-Phase der Ideengenerierung mit einer koordinierenden Aufgabe, die sich bspw. im Rahmen des Ideenmanagements in bestehende Ablauforganisationen von Unternehmen integrieren lässt. Für die proaktive Generierung von Digitalisierungsideen werden bestehende Methoden nach der Strategieebene und nach der treibenden Kraft (Technologie-Push bzw. Demand-Pull) systematisiert. Ein nach dem Modell von Fischer strukturierter und standardisierter Ideensteckbrief ermöglicht die effiziente Konsolidierung, anschließende Begutachtung und Anreicherung von Ideen im Rahmen von Mehrpersonenreviews. Für die abschließende Priorisierung von Ideen wird eine neue Methode vorgestellt. Die Ausgabe der Define-Phase ist ein priorisierter Ideenspeicher, der als transparente Ausgangsbasis für

die strategische Umsetzungsplanung von Digitalisierungsaktivitäten dient. Das beschriebene Vorgehen hat den Anspruch einen vollständigen und idealtypischen Erfassungsprozess für Digitalisierungsideen in produzierenden Unternehmen abzubilden. In der Praxis können situationsbedingt Anpassungen (engl. Tailoring) erforderlich sein. Exemplarisch werden in Tabelle 7 anhand von zwei Szenarien mögliche Tailoring-Maßnahmen und die damit einhergehenden Risiken aufgezeigt.

Tabelle 7: Mögliche Anpassungsmaßnahmen und deren Risiken

Szenario	Tailoring-Maßnahmen	Risiken
Themen mit sehr hoher Dringlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Verzicht auf eine explizite Ideenkonsolidierungsphase • Fokussierung des ausführlichen Review-Prozesses auf den Ideenbestandteil der Lösung • Repriorisierung nach Eisenhower-Prinzip 	<ul style="list-style-type: none"> • Synergieeffekte werden vorerst außer Acht gelassen • Vernachlässigung von Opportunitätskosten reduziert die Gesamteffektivität und -effizienz der Digitalisierung
Fehlende Kapazitäten von Fachexperten für Begutachtung aller Ideen	<ul style="list-style-type: none"> • Vorselektion von Ideen im Rahmen des Konsolidierungsschritt 	<ul style="list-style-type: none"> • Suboptimale Vorselektion von Ideen aufgrund fehlender umfassender Begutachtung und Anreicherung

4.2 Measure-Phase

In der zweiten Phase der DMAICS-Methodik wird der zu erwartende, effektive Nutzen für die ausgewählten Digitalisierungsideen der vorherigen *Define*-Phase ermittelt. Hierbei stellt sich die Teilforschungsfrage, ob sich dieser mit dem beschriebenen Vorgehen systematisch erheben lässt (vgl. Bild 24). Den mit der Nutzenermittlung assoziierten praktischen Problemmerkmalen und Forschungsdefiziten (vgl. These 2 in Bild 23) nähert sich die Methodik dabei wie folgt:

- Systematischer Umgang mit *Unsicherheiten bei der Planung* durch Mehrpersonenschätzungen und adäquater Methodenwahl (PM 1.1)
- *Prävention/Lösung von Interessenskonflikten* durch frühzeitige Sichtbarmachung von Wirkmechanismen (PM2.1)
- *Spezifikation der auszutauschenden Informationen* bei der Nutzenbestimmung (FD2.1)

Die Struktur der Inhalte der Measure-Phase und deren Einordnung in den Gesamtkontext der Digitalisierung ist in Bild 38 dargestellt.

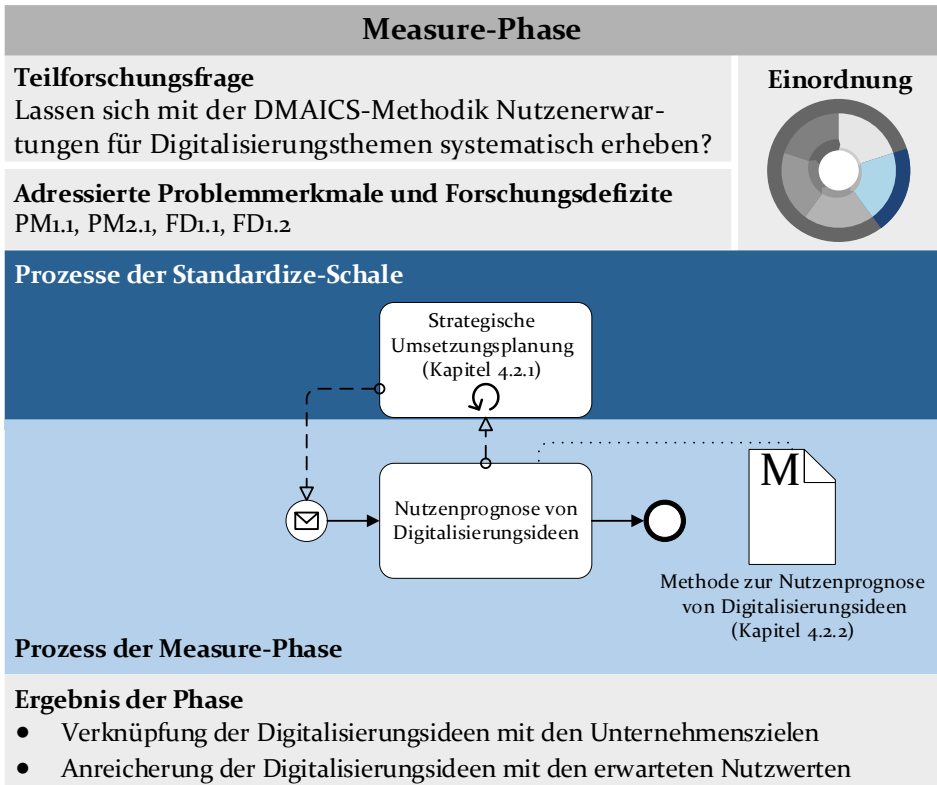


Bild 38: Vorgehen und Inhalt der Measure-Phase

Die Measure-Phase beinhaltet die Nutzenprognose von Digitalisierungsideen. Hierbei kann es sich gleichermaßen um strategische oder operative Digitalisierungsthemen handeln. Der Auslöser für die Nutzenprognose stellt die strategische Umsetzungsplanung dar. Diese hat zum Ziel, einen optimalen Umsetzungsplan von Digitalisierungsaktivitäten zu definieren. Die inhaltliche Herleitung und die visuelle Gestaltung eines solchen Umsetzungsplanes werden in Kapitel 4.2.1 dargelegt. Anschließend wird in Kapitel 4.2.2 eine Methode zur detaillierten Nutzenprognose von Digitalisierungsideen entwickelt. Die prognostizierten Nutzwerte dienen der bedarfsgerechten Anreicherung des strategischen Umsetzungsplanes zur Digitalisierung.

4.2.1 Strategische Umsetzungsplanung von Digitalisierungsmaßnahmen

Um Digitalisierungsideen koordiniert im Unternehmen umzusetzen, ist eine strategische Planung erforderlich. Diese dient den folgenden Zielen:

- Ausrichtung der Umsetzungsaktivitäten auf die Unternehmensstrategie
- Festlegung der Umsetzungsreihenfolge der Digitalisierungsideen
- Aufzeigen von Abhängigkeiten zwischen den Umsetzungsaufgaben
- Verknüpfung der erforderlichen strategischen Befähiger

Die Unternehmensstrategie wird hierbei ebenfalls als ein Maßnahmenplan zur Erreichung strategischer Unternehmensziele (vgl. Kapitel 2.2.3 und Kapitel 2.2.2) aufgefasst. Geplant wird die Umsetzungsstrategie von den jeweiligen strategischen und bevollmächtigten Funktionen in Form eines fortwährenden Portfoliomanagements oder eines zeitlich terminierten Programmmanagements. Ausgehend von dieser Planung, lässt sich eine Digitalisierungs-Roadmap ableiten. Dieser Prozess wird in Bild 39 veranschaulicht.

Roadmaps dienen zur übersichtlichen Darstellung der Entwicklung eines Betrachtungsgegenstandes. Eine strategische Unternehmens-Roadmap besteht somit aus einer Abfolge von Maßnahmen, die einen Beitrag zur Zielerreichung leisten. Digitalisierungsmaßnahmen stellen dabei eine Maßnahmenkategorie neben anderen (z.B. Rationalisierungs- oder Kapazitätsaufbaumaßnahmen) dar. Digitalisierungsmaßnahmen charakterisieren sich durch die Verwendung von IT-Systemen als Bestandteil des Lösungskonzeptes. Die vollständige Betrachtung aller Digitalisierungsmaßnahmen und deren zugrundeliegenden Systeme ermöglicht die Identifikation von möglichen Synergieeffekten und Abhängigkeiten. Unter Einbezug der aufgezeigten zeitlichen und technischen Abhängigkeiten lässt sich eine auf die Unternehmensstrategie ausgerichtete Digitalisierungs-Roadmap entwickeln, die die Umsetzungsreihenfolge, der für die Digitalisierungsmaßnahmen benötigten Systeme definiert. Die geplanten Fertigstellungstermine einzelner Systeme bzw. Systemversionen stellen die Meilensteine der Digitalisierungs-Roadmap dar.

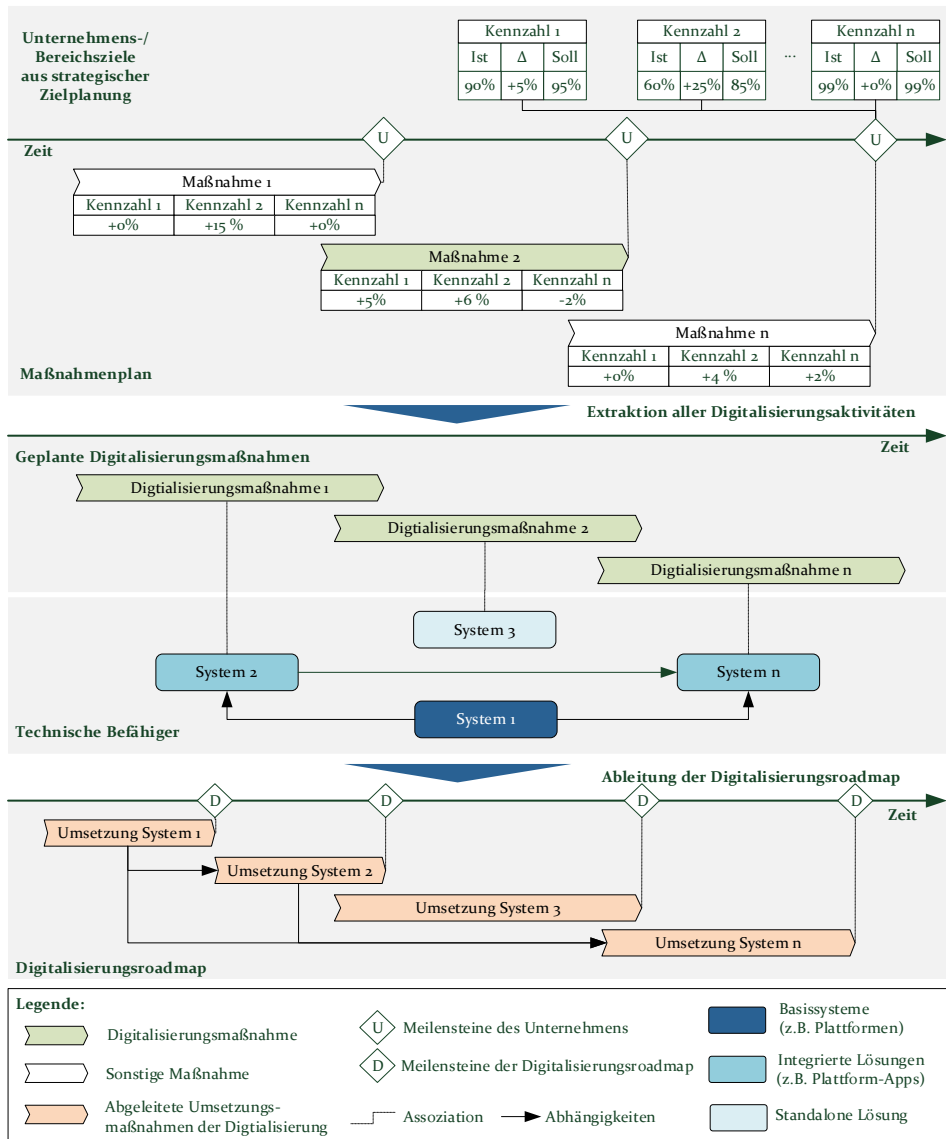


Bild 39: Ableitung einer Digitalisierungsroadmap auf Basis der strategischen Zielplanung

Bei der Erstellung einer Digitalisierungs-Roadmap werden zwei wesentliche Herausforderungen deutlich. Erstens müssen die für die Digitalisierungsmaßnahmen benötigten Systeme auf Basis eines vorhandenen Lösungskonzeptes auf abstrakter Ebene ersichtlich sein. (Sofern aus der Ideenbeschreibung kein klares Lösungskonzept hervorgeht, eignet sich das in Kapitel 4.3.1 beschriebene Vorgehen zur Entwicklung von Lösungs-

konzepten.) Zweitens stellt die Prognose des Beitrags zur Zielerreichung von Digitalisierungsmaßnahmen für die Rechtfertigung der Umsetzungsaufwände eine Herausforderung dar. Kapitel 4.2.2 zeigt hierfür eine Methode auf.

4.2.2 Methode zur Nutzenprognose von Digitalisierungsmaßnahmen

Digitalisierungsmaßnahmen gehen mit Realisierungsaufwänden einher. Um deren Umsetzung nach unternehmerischen Maßstäben zu rechtfertigen, ist eine Prognose des Gesamtnutzens in Form eines Beitrags zur strategischen Zielerreichung des Unternehmens erforderlich. Die in diesem Kapitel vorgestellte Methode zur Nutzenprognose gliedert sich in die zwei Schritte, der Ermittlung der Nutzennetzwerkstruktur und der anschließenden Prognose der Nutzwerte (siehe Bild 40).

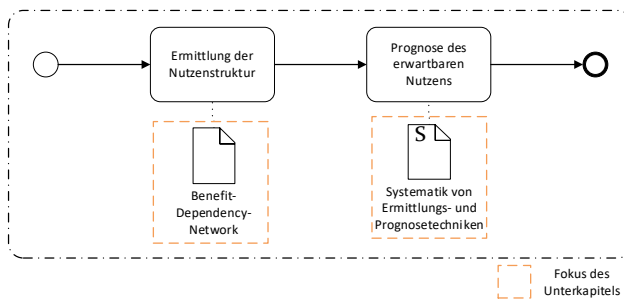


Bild 40: Prozessmodell Darstellung der Methode zur Nutzenprognose von Digitalisierungsideen

Ermittlung der Nutzenstruktur

Die Ermittlung der Nutzenstruktur dient der Aufschlüsselung verschiedener Nutzwerte und deren Wirkzusammenhänge untereinander. Eine solche Nutzenstruktur lässt sich nach Ward visuell in einem Benefit-Dependency-Network abbilden (siehe Bild 41) [185].

In dem Business-Dependency-Network nach Ward werden die Wirkzusammenhänge zwischen technischen Systemen (*IT-Enabler*), deren Funktionen und den effektiv hervorgerufenen Geschäftsänderungen abgebildet [202]. Diese Änderungen wirken sich auf operative Zielgrößen aus. Diese können monetärer und nicht monetärer Natur sein. Wichtig zu berücksichtigen ist, dass durch *Änderungen* Nutzwerte sowohl positiv, als auch negativ beeinflusst werden können. Beispielsweise kann sich eine Prozessänderung positiv auf die Zielgröße Prozessqualität auswirken und

gleichzeitig die Prozesszeit negativ beeinträchtigen. Damit können in der Nutzennetzwerkstruktur auch Interessenskonflikte aufgezeigt werden. Weiterhin können verschiedene Zwischennutzen in dieselben übergeordneten Endnutzen einzahlen. Durch eine explizite Darstellung der Wirkzusammenhänge lassen sich kausale Schlüsse bei der Argumentation des Gesamtnutzens plausibilisieren. Zur Sicherstellung der Strategiekonformität einer Idee sind die mittels der Nutzenstruktur ermittelten Endnutzen den übergeordneten Unternehmens- bzw. Bereichszielen zuzuordnen. Durch die Ermittlung der Nutzenstruktur ist eine vollständige und überprüfbare kausale Kette an Wirkzusammenhängen ausgehend von den technischen Befähigern, bis hin zum Beitrag der strategischen Zielerreichung gegeben. Somit eignet sich das gezeigte Vorgehen auch für sog. strategische Basisbefähiger einer Digitalisierungs-Roadmap (vgl. Bild 39).

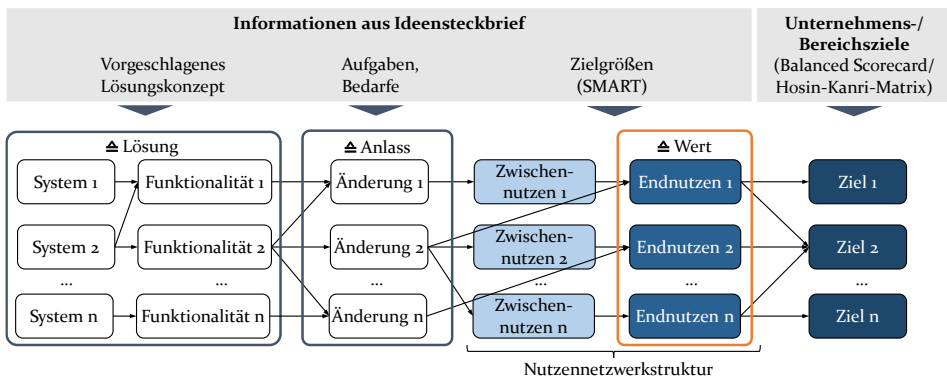


Bild 41: Erstellung der Nutzennetzwerkstruktur als Bindeglied zwischen digitaler Lösung und Unternehmenszielen i.A.a. [202]

Systematisierung von Ermittlungs- und Prognosetechniken

Im zweiten Methodenschritt sind die erwarteten Nutzwerte zu prognostizieren. Dazu werden die Nutzennetzwerkstrukturen mit Erwartungswerten der einzelnen Zielgrößen angereichert. Der effektive Wert eines jeden Nutzens entspricht dabei stets dem Delta zwischen Soll- und Ist-Wert der jeweiligen Zielgröße. Während sich Ist-Werte empirisch ermitteln lassen, lassen sich die erreichbaren Soll-Werte lediglich prognostizieren. Für die Ermittlung als auch die Prognose existieren eine Vielzahl an Methoden und Techniken [203, 204]. Zur Unterstützung des Methodenauswahlprozesses, werden diese in Bild 42 systematisiert.

Existierende Verfahren der Ermittlung des Ist-Zustandes, lassen sich nach der Art der Datenerhebung in Verfahren der Sekundär- und Primärerhebung unterscheiden. Da Verfahren der Sekundärerhebung keine

zusätzliche Datenerhebung erfordern, werden diese in der Literatur als weniger kostenintensiv bewertet [204]. Verfahren zur Prognose des Soll-Zustands lassen sich in qualitative sowie quantitative Methoden unterteilen [203]. Die Güte der Schätzwerte bei der Durchführung ist abhängig von dem gemeinsamen Wissens- und Erfahrungsstands der einbezogenen Personen. Daher sind in den Durchführungsprozess qualitativer Methoden Vertreter:innen verschiedener Stakeholdergruppen und Wissensträger:innen explizit und gezielt einzubeziehen und die Methoden zur Konsensbildung anzuwenden (vgl. Bild 8).

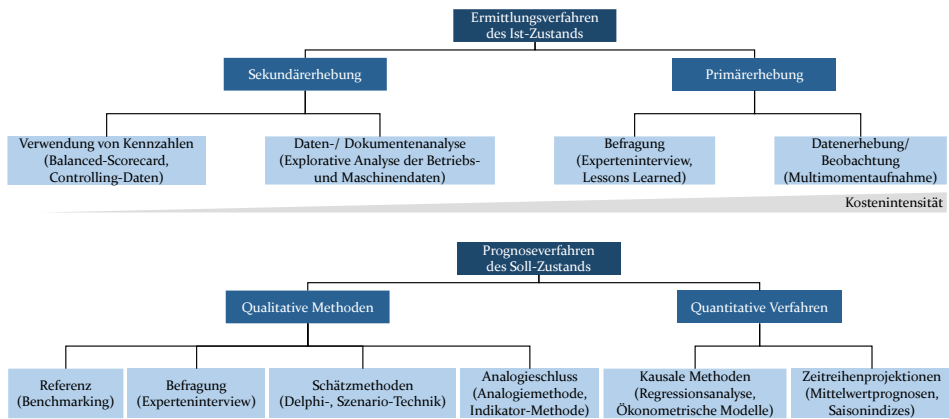


Bild 42: Systematisierung von Methoden zur Ist-Zustandsermittlung i.A.a. [204] sowie Soll-Zustandsprognose i.A.a. [203]

4.2.3 Zwischenfazit zur Measure-Phase

Die Measure-Phase thematisiert die Teilforschungsfrage, wie sich die zu erwartenden Nutzwerte von Digitalisierungsideen ermitteln lassen. Den Auslöser der Nutzwertermittlung stellt die strategische Umsetzungsplanung dar. Dadurch wird sichergestellt, dass Digitalisierungsmaßnahmen in einem für das Unternehmen planmäßigen und optimalen Vorgehen erfolgen. Das zentrale Werkzeug zur Planerstellung äußert sich als eine auf die Unternehmensziele ausgerichtete bzw. davon abgeleitete Digitalisierungs-Roadmap, welche die Umsetzungreihenfolge von Digitalisierungsaktivitäten auf Basis grundlegender Abhängigkeiten definiert. Synergien, die sich durch die Anwendung einer strategischen Planung ergeben, ermöglichen dabei den Gewinn zusätzlicher Effizienzpotentiale. Dazu zählen insbesondere Basisbefähiger, wie Plattform- oder Backend-Systeme, die das Fundament für aufbauende Digitalisierungslösungen bilden. Sie sind, in logischer Konsequenz, zeitlich vorgelagert umzusetzen. Diese Basis-Systeme liefern

in der Regel noch keinen direkten monetären Mehrwert und sind daher auch als strategische Befähiger zu betrachten, deren wirtschaftliche Rechtfertigung sich jedoch über die in Bild 39 visualisierten Zusammenhänge plausibilisieren lassen. Eine verfeinerte Ermittlung der Nutzwerte von Digitalisierungslösungen lässt sich mit der in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Methode zur Nutzenprognose erreichen, in der zunächst die Nutzenstrukturen mittels eines Benefit-Dependency-Networks transparent gemacht und anschließend systematisch prognostiziert werden. Die ermittelten Nutzwerte dienen als fundierte Grundlage für eine spätere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durch die Gegenüberstellung der Umsetzungs- und Betriebsaufwände. Weiterhin werden diese Nutzwerte zur Anreicherung der auf die Unternehmensziele ausgerichteten Digitalisierung-Roadmap verwendet, die dadurch ihrer Funktion als ein fundierter Umsetzungsplan gerecht wird.

4.3 Analyze-Phase

Die dritte Phase der DMAICS-Methodik zielt auf die Entwicklung optimaler Lösungskonzepte für die Digitalisierung im Unternehmenskontext und die systematische Bildung geeigneter Projektkonstellationen für deren Umsetzung ab. Hierbei stellt sich je die Teilforschungsfrage, ob die Methodik diesem Anspruch gerecht wird. Den mit den genannten Aufgabenbereichen verbundenen praktischen Problemmerkmalen und Forschungsdefiziten (siehe These 3+4 in Bild 23) begegnet die Methodik wie folgt:

- *Prävention/Lösung von Interessenkonflikten* durch die Berücksichtigung strategischer Aspekte unterschiedlicher Fachdomänen bei der Entwicklung von Lösungskonzepten (PM2.1)
- *Antizipation des entstehenden Synchronisationsbedarfs* bei der Bildung geeigneter Projektkonstellationen (PM3.2)
- *Berücksichtigung dynamischer Herausforderungen* beim Einsatz volatiler, neuer Technologien (PM3.3)
- *Erläuterung einer Methode zur interdisziplinären Entwicklung optimaler Lösungskonzepte* (FD2.2)
- *Erläuterung einer Methode zur systematischen Projektvorbereitung und -initialisierung* (FD2.3)

Das Prozessmodell der Analyze-Phase gliedert sich in drei Teilaufgaben (vgl. Bild 43). Die erste stellt die Entwicklung von Lösungskonzepten dar. Hierzu wird in Kapitel 4.3.1 eine neue *Methode zur interdisziplinären Entwicklung optimaler Lösungskonzepte* der Digitalisierung im Unternehmenskontext aufgezeigt. Die Methode bildet ein Rahmenwerk für das

effiziente Zusammenwirken verschiedener Fachdomänen unter gleichzeitiger Berücksichtigung der jeweiligen Bereichsstrategie. Die zweite Aufgabe fokussiert die Projektplanung. Dabei wird in Kapitel 4.3.2 eine Methode zur ganzheitlichen Projektplanung vorgestellt. In Abhängigkeit von den im Rahmen der Projektplanung definierten Vorbedingungen erfolgt in Kapitel 4.3.3 eine Systematisierung der projektvorbereitenden Tätigkeiten. Die Projektfreigabe impliziert strategische, leitende Funktionen und ist somit wiederum dem koordinierenden Unterprozess der Projektinitialisierung zuzuordnen.

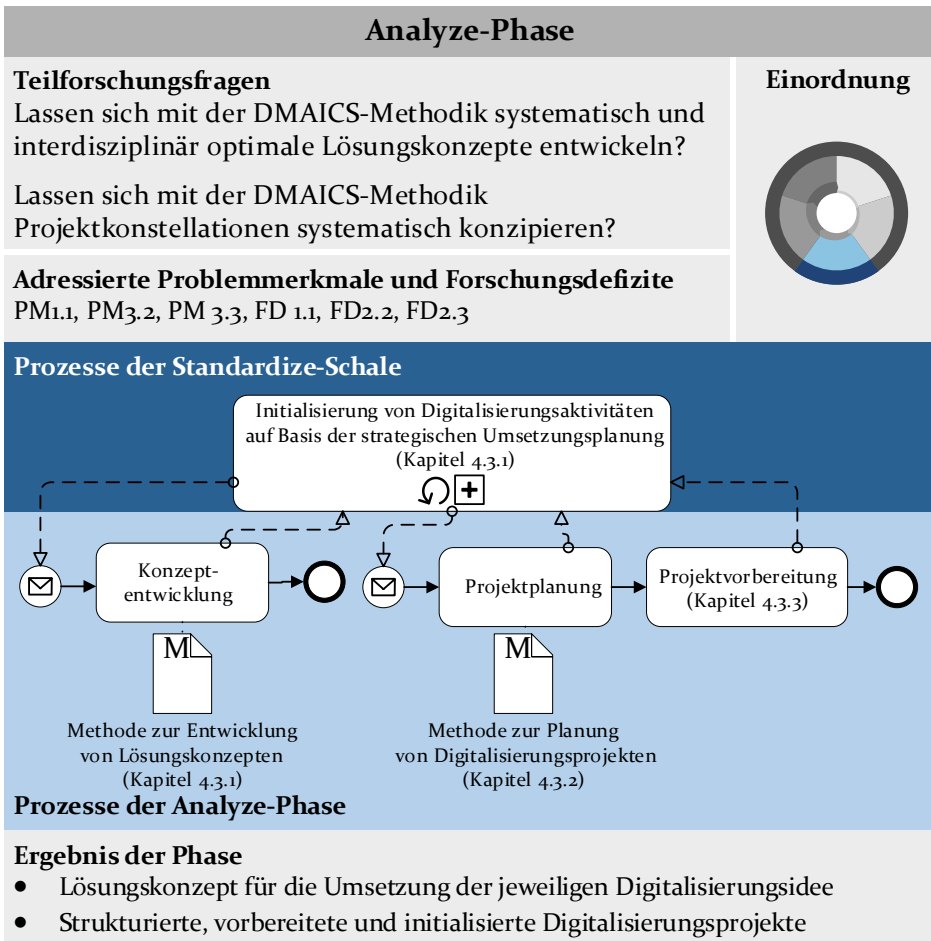


Bild 43: Vorgehen und Inhalte der Analyse-Phase

4.3.1 Methode zur interdisziplinären Entwicklung von Lösungskonzepten für die Digitalisierung im Produktionsbereich

Strategische und leitende Funktionen initialisieren Digitalisierungsaktivitäten der vorangegangenen strategischen Umsetzungsplanung (vgl. Kapitel 4.2.1). Dabei kann die Entwicklung ausgereifter Lösungskonzepte nötig sein, welche als eigenständige Aufgabe von einer ernannten leitenden Person der Konzeptphase zu bewerkstelligen ist. Im Kontext der Digitalisierung erfordert dies meist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit (vgl. Kapitel 2.1.3). Für eine systematische Durchführung der Konzepterstellung wird eine Methode nachfolgend vorgestellt. Auf Basis des erstellten Lösungskonzeptes und der in der vorhergehenden Phase bestimmten Nutzwerte, entscheiden leitende Instanzen über die Umsetzung. Mit der Erteilung des Umsetzungsauftrages an einen Projekteigner wird die jeweilige Digitalisierungsaktivität freigegeben. Zur Veranschaulichung dieses Prozesses zeigt Bild 44 ein Kollaborationsdiagramm von drei Parteien.

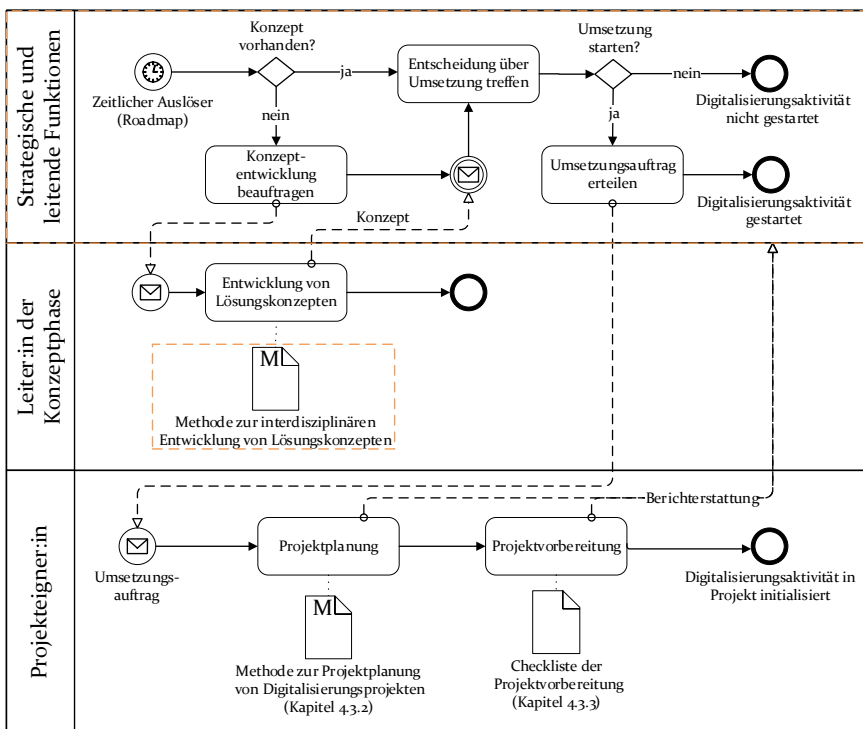
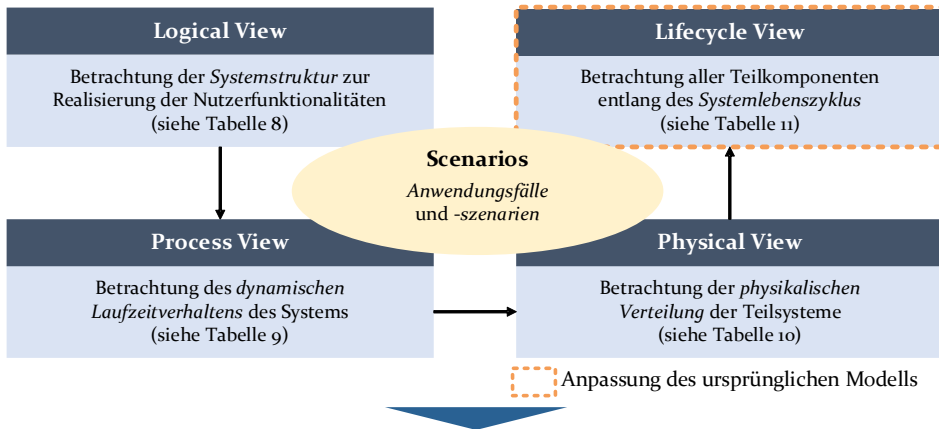


Bild 44: Einordnung der Methode in den Prozess der Initialisierung von Digitalisierungsaktivitäten

Methode zur interdisziplinären Entwicklung von Lösungskonzepten

Die Methode zur interdisziplinären Entwicklung von Lösungskonzepten ist an das aus der Softwarearchitekturentwicklung bekannte 4+1-Sichtenmodell nach Kruchten angelehnt (siehe Bild 45) [205].

Modifiziertes 4+1-Sichtenmodell i.a.A. Kruchten



Prozessmodell Darstellung

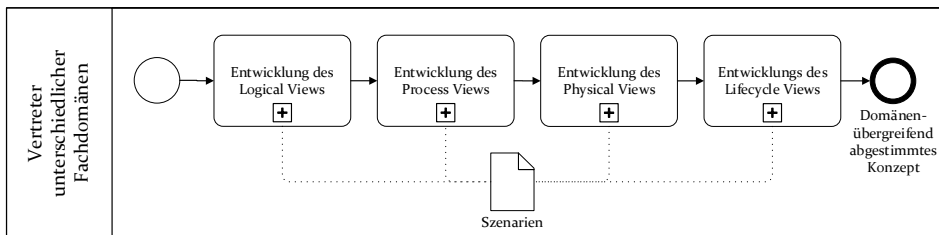


Bild 45: Angepasstes 4+1 Sichtenmodell zur Konzeptentwicklung von Digitalisierungs-lösungen im Produktionsbereich i.A.a. Kruchten [205]

Das in Bild 45 gezeigte Modell fungiert als Rahmenwerk (Framework) für die interdisziplinäre Entwicklung von Lösungskonzepten. Durch das Einnehmen vordefinierter „Sichten“ können gleichartige Problemaspekte verschiedener Domänen, strukturiert und damit effizient eruiert werden. Die erste Sicht, und damit auch die Ausgangsbasis für die Entwicklung der weiteren vier Sichten, stellen *Szenarien* dar, welche aus Anwendungsfallbeschreibungen oder wie im Bereich des agilen Arbeitens üblich, auch als User-Stories, formuliert sind. Die erste „Entwicklungs“-Sicht stellt der *Logical View* dar, der auf abstrakter und technologieutraler Ebene eine Systemstruktur zur Realisierung der geforderten Nutzerfunktionalitäten definiert. Im *Process View* wird das dynamische Laufzeitverhalten der Systemkomponenten beschrieben. Dadurch werden benötigte Schnittstellen und

darüber auszutauschende Informationen ersichtlich. Im *Physical View* werden mögliche Hard- und Softwarealternativen für die Realisierung der Systemarchitektur ausgewählt und ihre physikalische Verteilung definiert. In der letzten Perspektive werden die Lösungsalternativen entlang des Systemlebenszyklus betrachtet. Hierfür wurde der ursprüngliche *Development View* durch einen *Lifecycle View* ersetzt. Dieser legt die Verantwortlichkeiten der unterschiedlichen Systemkomponenten entlang des Systemlebenszyklus (Entwicklung, Beschaffung, Inbetriebnahme, Betrieb, Wartung/Support, Änderung, Außerbetriebnahme) fest. Die explizite Darstellung der Zuständigkeiten und Abhängigkeiten dient der Sicherstellung der nachhaltigen Einsetzbarkeit der zu entwickelnden Systeme. Das Prozessmodell zur Entwicklung der verschiedenen Sichten des 4+1 Sichtenmodells ist in Bild 46 illustriert.

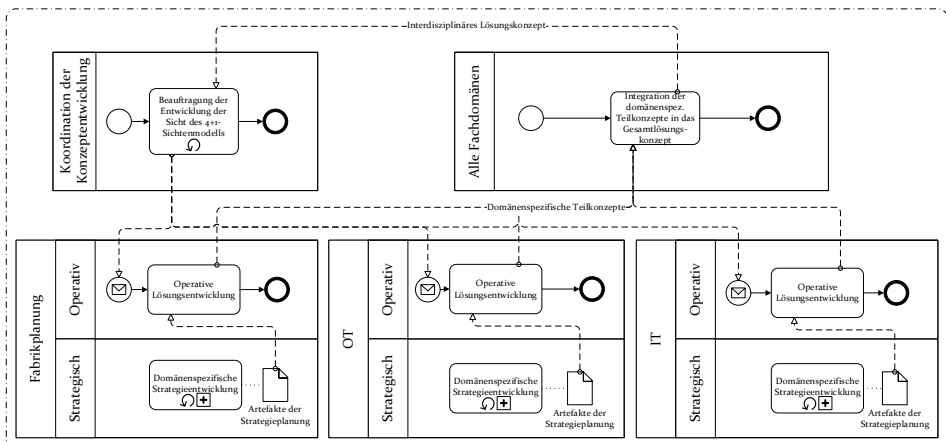


Bild 46: Prozessmodell zur Entwicklung der Gesamtlösungskonzepte aller Sichten des 4+1 Sichtenmodells

In Abhängigkeit von der Komplexität des Digitalisierungsthemas sind die Kompetenzen mehrerer Fachdomänen für den Entwicklungsprozess notwendig. Der Grund dafür ist, dass Lösungsbestandteile verschiedener Fachdomänen bestmöglich auf die jeweilige Bereichsstrategie auszurichten sind. Zeitgleich existieren Wechselwirkungen zwischen den Teillösungen verschiedener Domänen. Das Ziel der interdisziplinären Zusammenarbeit ist das Finden eines optimalen Gesamtlösungskonzeptes in Bezug auf die effektive und effiziente Lösungsumsetzung des Einzelthemas sowie auf strategische Aspekte im Unternehmenskontext.

Die Entwicklung der Teilkonzepte basiert auf den Szenarien-Beschreibungen (vgl. *Ideensteckbrief* in Bild 31), dem Gesamtlösungskonzept vorhergehender „Sichten“ (sofern vorhanden) und Teillösungskonzepten anderer

Domänen. Eine vollständige Detaillierung aller operativen und strategischen Methoden und Artefakte der drei Fachdomänen würde den Rahmen dieser Dissertationsschrift überschreiten, doch werden zur Veranschaulichung der Anwendbarkeit des Modells relevante Methoden und Artefakte (Werkzeuge) für die Entwicklung der jeweiligen Sichten in Tabelle 8 bis Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 8: Inhaltliche Detaillierung mittels operativer und strategischer Methoden sowie relevanter Artefakte des "Logical Views" nach Fachdomäne

Fachdomäne	Operative Methoden und Artefakte	Strategische Methoden und Artefakte
<p>Interdisziplinär: Konzeptionelle Definition der Systemstruktur zur Realisierung der Nutzenfunktionalitäten</p>	<p>Artefakte in gemeinsamer Modellierungssprache:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Klassendiagramm (UML) • Blockdefinitionsdiagramm (SysML) • Anwendungsfalldiagramm (UML, SysML) 	
<p>IT: Grobkonzept der IT-technischen Systemstruktur</p>	<p>Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modellgetriebene Softwareentwicklung [206] <p>Artefakte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Software Design Beschreibung [207] • Definition von Modulen und Schnittstellen 	<p>Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Applikationsportfolioplanung [208] • Service Management [208] <p>Artefakte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • IT-Landschaft • IT-Roadmap • Service-Katalog • Best Practice Sammlung
<p>OT: Grobkonzept der IT-technischen Systemstruktur</p>	<p>Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Architekturplanung des Systems Engineering [98] <p>Artefakte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abstrakte Definition der OT-technischen Systemelemente • Definition der Systemgrenzen & Schnittstellen der OT-technischen Teillösung 	<p>Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baukastenentwicklung • Entwicklung generischer Lösungen <p>Artefakte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Standardbausteine • Best Practice-Sammlung • Generische Lösungskonzepte aus der Literatur (z.B. SCPS HF...)
<p>Fabrikplanung: Idealplanung nach gewählten Lösungsansatz</p>	<p>Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Integrated Factory Modeling • Requirements-Engineering <p>Artefakte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Layoutpläne • Funktionsschema • Formalisierung benötigter Nutzerfunktionalitäten (Dimensionierung, Leistungsbestimmung) 	<p>Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agile und schlanke Fabrikplanung nach dem Aachener Fabrikplanungsvorgehen [209] • Modulare Fabrikplanung [210] • Fraktale Fabrikplanung [211] • Wandlungsfähige Fabrik [212] <p>Artefakte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Übergeordnete Fertigungskonzepte

Im *Logical View* ist die Systemstruktur zur Realisierung des Kundennutzens konzipiert. Von Seiten der Fabrikplanung ist dazu eine Idealplanung in Abstimmung mit dem Fabrikkonzept und in Abhängigkeit von dem strategischen Planungsvorgehen durchzuführen. Die Ergebnisse stellen die festgelegten Funktionalitäten, eine grobe Strukturierung der Systemelemente und die Dimensionierung dar, die sich in Form von Funktionsschemata, Ablauf- sowie Layoutplänen formalisieren lassen. Ausgehend davon definiert die Fachdomäne der OT benötigte Systembausteine und deren Schnittstellen. Dabei ist aus strategischer Sicht der Einsatz von Standard-

komponenten vorzusehen. Für die Architekturplanung von OT-technischen Methoden existieren vielfältige Methoden im Bereich des Systems Engineering. Der Systementwurf aus OT-Sicht wird von der IT um die Anbindung an übergeordnete IT-Systeme ergänzt. Zur Erreichung der Strategiekonformität werden vorzugsweise wiederverwendbare IT-Dienste eingebunden. In einer interdisziplinären Integration der domänenspezifischen Teillösungen wird der idealtypische Systementwurf unter Verwendung gemeinsamer Modellierungssprachen finalisiert.

Tabelle 9: Inhaltliche Detaillierung mittels operativer und strategischer Methoden sowie relevanter Artefakte des "Process Views" nach Fachdomäne

Fachdomäne	Operative Methoden und Artefakte	Strategische Methoden und Artefakte
Interdisziplinär: Konzipierung des dynamischen Laufzeitverhaltens	Artefakte in gemeinsamer Modellierungssprache: <ul style="list-style-type: none"> Sequenzdiagramm (UML, SysML) Aktivitätsdiagramm (UML, SysML) Petri-Netz (FMC) Zustandsdiagramm (SysML) 	
IT: Modellierung des Laufzeitverhaltens IT-technischer Systembestandteile	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> Entwicklung Service orientierter Architekturen, Service Design nach ITIL [33] Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> Schnittstellendokumentationen 	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> Service-Management ITIL Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> Service-Kataloge nach ITIL inkl. Schnittstellenbeschreibung Integrationsplattform
OT: Modellierung des Laufzeitverhaltens OT-technischer Systembestandteile	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> Design for Interoperability [213] Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> Vorgabe Software-, Hardware- und Bedienschnittstellen Beschreibung des Zustandsautomaten (Blackbox-Betrachtung des OT-Systems) 	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> proprietär Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> Standardisierter OT-technischer Interoperabilitäts-Technologiestack bestehend aus Protokollen, Datenformaten, Semantik, Ontologien, Companion Specifications
Fabrikplanung: Vorgabe des angestrebten Prozessablaufs	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> Semantische Prozessmodellierung [214] Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> Betriebsverhalten Materialflüsse Informationsflüsse 	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> ARIS-Prozessmodellierung [215] Organisations-, Funktions-, Prozesssicht Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> Integrierte Prozessmodelle (EPK, BPNM)

Das Ziel des *Process Views* ist die Sicherstellung der Interoperabilität der Teilsysteme auf Basis der Abbildung des dynamischen Laufzeitverhaltens. Die Fachdomäne der Fabrikplanung gibt hierbei die Rahmenbedingungen für das Betriebsverhalten in Abstimmung mit übergeordneten Prozessmodellen vor. Die Konzeption der Interoperabilität OT-technischer Systembestandteile zählt zur Zuständigkeit der OT-Fachdomäne. Zur Vermeidung von heterogenen Schnittstellenlandschaften eignet sich ein unternehmens- bzw. bereichsweiter, standardisierter Technologiestack für die Interoperabilität. Sofern eine Konnektivierung des OT-Systems an IT-Systeme vorliegt, gilt es aus Sicht der IT ebenfalls entsprechende Schnittstellen bereitzustellen. Integrationsplattformen stellen einen Ansatz dar, die benötigten

Schnittstellenbeschreibungen autark zu offerieren. Durch die interdisziplinäre Erarbeitung des dynamischen Laufzeitverhaltens, werden die Kompatibilitäten der IT- und OT-Systeme gewährleistet.

Tabelle 10: Inhaltliche Detaillierung mittels operativer und strategischer Methoden sowie relevanter Artefakte des "Physical Views" nach Fachdomäne

Fachdomäne	Operative Methoden und Artefakte	Strategische Methoden und Artefakte
Interdisziplinär: Definition der physikalischen Verteilung der Teilsysteme	Artefakte in gemeinsamer Modellierungssprache <ul style="list-style-type: none"> • Blockdiagramm (FMC) • Netzwerkdigramm • Morphologischer Kasten mit IT und OT-technische Komponentenalternativen 	
IT: Vorgabe des Konzepts zur phys. Verteilung von IT-Komponentenalternativen	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung modularer Servicearchitekturen [216] • Entwicklung der IT-technischen Netzarchitektur Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> • Netzwerkkonzepte • Vorgabe IT-Komponentenalternativen 	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Service Management nach ITIL [217] • Infrastrukturplanung Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> • IT-Governance [217] • IT-Landschaft • IT-Roadmap • Service-Katalog (vgl. ITIL)
OT: Vorgabe Konzept zur phys. Verteilung von OT-Komponentenalternativen	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Systems Engineering, funktionale Sicherheit [218] Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> • Physikalisches Verteilkonzept der OT-Komponenten (Hardware, Software) • Vorgabe OT-Komponentenalternativen 	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Standardisierungsmethoden Werkzeuge: <ul style="list-style-type: none"> • Best-Practices • Baukastensystem mit unterstützenden Hard- & Softwarekomponenten • OT-Policy
Fabrikplanung: Einschränkungen bzgl. der Verteilung der Systemkomponenten	Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> • Layouteinschränkungen • Ergonomieaspekte 	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Gestaltung von Arbeitssystemen [219] • Building Information Modeling Artefakte <ul style="list-style-type: none"> • Layoutpläne • Building Information Model

Der Physical View legt die physikalische Verteilung der Hard- und Softwarekomponenten fest. Die Fabrikplanung gibt die bestehenden Designeinschränkungen bzgl. der Layoutplanung und Ergonomieaspekten vor. Innerhalb dieses Rahmens definiert die OT-Fachdomäne die Verteilung der Komponenten ihres Zuständigkeitsbereichs. Insbesondere werden dabei Design-Restriktionen berücksichtigt, welche der Gewährleistung der funktionalen Sicherheit dienen. Strategisch lässt sich dieser Prozess durch die Vorgabe von OT-Policies und wiederverwendbaren Lösungsbausteinen unterstützen. Nach ähnlichem Vorgehen plant die IT-Fachdomäne die Verteilung ihrer Komponenten, jedoch stehen dabei Aspekte der IT-Sicherheit, Verfügbarkeit und Latenz im Fokus. Die Auswahl von Komponentenalternativen (On-Premises-Lösungen, Cloud-Computing) wird hierbei von strategischen Gesichtspunkten der IT-Roadmap und im Rahmen der IT-Governance geprägt. Gemeinschaftlich lässt sich ein strategiekonformes

Gesamtkonzept der physikalischen Verteilung der Systemkomponenten bspw. in Block oder Netzwerkdiagrammen des Fundamental Modeling Concepts (FMC) formalisieren.

Tabelle 11: Inhaltliche Detaillierung mittels operativer und strategischer Methoden sowie relevanter Artefakte des "Lifecycle Views" nach Fachdomäne

Fachdomäne	Operative Methoden und Artefakte	Strategische Methoden und Artefakte
Interdisziplinär: Betriebskonzept für das Gesamtsystem entlang des Lebenszyklus	Artefakte in gemeinsamer Sprache <ul style="list-style-type: none"> • Verantwortlichkeitsmatrix • Zuständigkeitsdiagramm • Abhängigkeitsdiagramm • Service-Level-Agreements 	
IT: Betreuungsaufwände IT-technischer Systembestandteile	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Technologie Risikoassessment Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> • Informationen der Service-Level-Agreements IT-Komponentenalternativen • Risikobewertung bzgl. technischer Abhängigkeiten entlang des Systemlebenszyklus (insbes. Lizenzen, Bibliotheks-, Betriebssystemversionen) 	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Konzeption von Service-Level-Agreements Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> • Service-Level-Agreements von Standardkomponenten
OT: Betreuungsaufwände IT-technischer Systembestandteile	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Technologie Risikoassessment Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> • Service-Level-Agreement aller OT-Komponentenalternativen • Risikobewertung bzgl. technischer Abhängigkeiten entlang des Systemlebenszyklus (Softwareversionen, Hardware-Ersatzteile) 	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Konzeption von Service-Level-Agreements Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> • Service-Level-Agreements von Standardkomponenten
Fabrikplanung: Anforderungen an die Betreuung der Gesamtlösung	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Anforderungsengineering hinsichtlich des Betriebskonzept Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen entlang des Lebenszyklus (Zeithorizont, Flexibilität, Wandelbarkeit) 	Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Produktionsportfolioplanung Artefakte: <ul style="list-style-type: none"> • Produktionsportfolio

Mithilfe des Lifecycle Views werden mögliche Lösungskonzepte hinsichtlich der Betriebbarkeit entlang des Systemlebenszyklus analysiert. Hierzu werden Flexibilitäts- und Wandelbarkeitsanforderungen sowie Zeithorizonte bzgl. des geplanten Systemeinsatzes von der Fachdomäne der Fabrikplanung vorgegeben. Mithilfe von Service-Level-Agreements können die OT- und IT-Fachdomänen Aufwände für den Betrieb, den Support, Änderungen und Wartungen grob abschätzen. Die jeweiligen Zuständigkeiten lassen sich in Verantwortlichkeitsmatrizen übersichtlich festhalten. Weiterhin sind technische Abhängigkeiten entlang des Lebenszyklus zu berücksichtigen, bspw. die kürzeren Softwarelebenszyklen der IT-Welt, verglichen mit OT-Komponenten und damit verbundene System-Anpassungen. Derartige Abhängigkeiten sowie ihre Kritikalität lassen sich in Risikoassessments bewerten. Das Ziel des Lifecycle Views ist somit den nachhaltigen Einsatz und die Beherrschbarkeit oftmals komplexer Technologiekombinationen in einem stets der Veränderung ausgesetzten Produktionsumfeld zu gewährleisten.

4.3.2 Methode zur Projektplanung von Digitalisierungsprojekten

Digitalisierungsmaßnahmen stellen eine Aktivität außerhalb des Regelbetriebs der Ablauforganisation dar und werden daher implizit oder explizit als Projekte realisiert. Dies ist damit zu begründen, dass cross-funktionale Projektteams agiler und damit schlagkräftiger bei der Umsetzung komplexer Aufgaben sind, als dies mit den klassischen, hierarchischen Aufbauorganisationsformen (vgl. Kapitel 2.2.4 sowie Bild 17) der Fall wäre. Nachdem mit der Freigabe einer Digitalisierungsaktivität die Projektdefinition im Rahmen der Strategieplanung bereits erfolgt ist, bildet die Projektplanung den nächsten Hauptschritt des Projektmanagements. Bild 47 zeigt hierzu eine Methode zur ganzheitlichen Projektplanung für Digitalisierungsprojekte in Unternehmen auf.

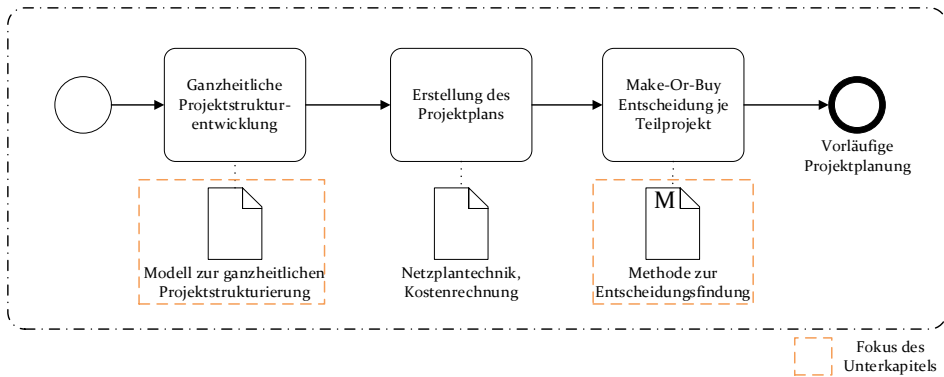


Bild 47: Methode der ganzheitlichen Projektplanung für die Umsetzung nachhaltiger Digitalisierungslösungen

Im ersten Methodenschritt werden auf Basis einer ganzheitlichen Betrachtung ideale *Projektstrukturen* modellbasiert entwickelt. Anschließend werden die Teilprojekte der Projektstruktur anhand ihrer Charakteristiken klassifiziert und in einem *Projektplan* organisiert. Für die Durchführung der Teilprojekte des Projektplans sind *Make-Or-Buy-Entscheidungen* zu treffen. Dieser Prozess wird durch eine weitere Unter Methode systematisiert und unterstützt. Das Ergebnis ist eine erste Version der Projektplanung, welche im Rahmen der Projektkontrolle und -steuerung projektbegleitend aktualisiert wird.

Modell zur ganzheitlichen Projektstrukturplanung

DIN 69900 beschreibt die Entwicklung eines Projektstrukturplans als einen Schritt zur Handhabarmachung von großen Projekten [220]. Im Projektmanagement wird hierbei eine *phasen-*, eine *objekt-* sowie eine *funktionsorientierte* Projektstrukturierung unterschieden [71]. Diese bergen die folgenden Vorteile:

- **Phasenorientierte Strukturierung:** Ende-zu-Ende-Betrachtung des Projekts
- **Objektorientierte Strukturierung:** Zerlegung des Projektergebnisses in modulare Teilergebnisse
- **Funktionsorientierte Strukturierung:** Bündelung von Verantwortlichkeiten nach Funktionen

Die Wahl *einer* Strukturierungsart führt bei Digitalisierungsprojekten jedoch zu Defiziten bei der Betrachtung der jeweils beiden anderen Arten. Weiterhin beziehen sich bestehende Projektstrukturierungsmethoden lediglich auf Aspekte des Projektlebenszyklus. Zur Gewährleistung der Beherrschbarkeit des Betriebes der entwickelten Digitalisierungslösungen muss jedoch der vollständige Systemlebenszyklus betrachtet werden. Um dies zu erreichen, wurde eine modellhafte Darstellungsform entworfen, welche die drei Strukturierungskonzepte miteinander kombiniert und den Betrachtungshorizont der Projektstrukturierung auf den Systemlebenszyklus erweitert (siehe Bild 48).

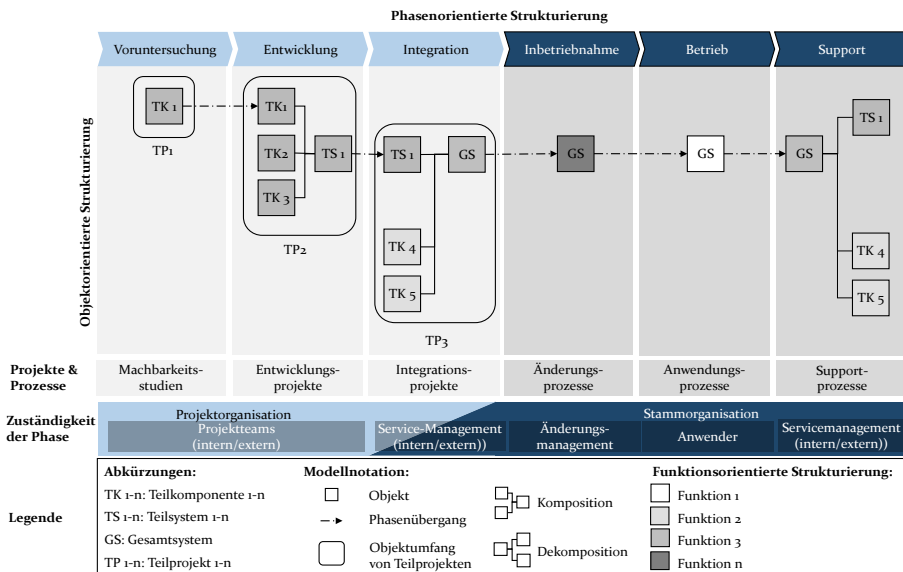


Bild 48: Modell zur ganzheitlichen Projektstrukturierung

Zur Anwendung des in Bild 48 gezeigten Modells wird zunächst eine objektorientierte Strukturierung der zu entwickelnden Digitalisierungslösung erstellt. Hierfür sind die Teilkomponenten und -systeme der Gesamtlösung, welche sich aus dem Lösungskonzept (siehe Bild 45) entnehmen lassen, in ein Baumdiagramm zu überführen. Im nächsten Schritt sind die Objekte des Baumdiagramm in horizontaler Richtung in die Phasenstruktur zu übertragen. Für die Phasenstruktur werden sechs Phasen definiert. Die ersten drei Phasen gliedern auf generische Weise den Projektlebenszyklus einer jeden Digitalisierungslösung. Diese lauten wie folgt:

- **Voruntersuchungsphase:** Zuordnung kritischer Teilkomponenten, deren Machbarkeit untersucht werden muss
- **Entwicklungsphase:** Entwicklung modularer Teilkomponenten und -systeme
- **Integrationsphase:** Überführung von Teillösungen in das IT-, OT-Ökosystem der Produktion

Für die Überführung der Objektstruktur in diese drei Phasen wird ausgehend von dem Gesamtsystem in der Integrationsphase ein rückwärtsgerichtetes Vorgehen empfohlen. Somit ist, ähnlich wie bei einer Rückwärts-terminierung, sichergestellt, dass zum Ende der Projektlaufzeit alle Teilsysteme sich in einer integrierten Gesamtlösung zusammenfügen. Weitere Teilsysteme und -komponenten der Integrationsphase sind fertig entwickelte Lösungen, wie bspw. zugekaufte Softwaresysteme oder bereits bestehende Services. Noch zu entwickelnde Teilsysteme und -komponenten werden in die Entwicklungsphase übertragen. Kritische Komponenten, deren Machbarkeit noch untersucht werden muss, werden zusätzlich in die Voruntersuchungsphase gezogen.

Für die vollständige Lebenszyklusbetrachtung des zu entwickelnden Gesamtsystems werden drei weitere Phasen ergänzt:

- **Inbetriebnahmephase:** Einführung neuer Prozesse unter Nutzung der integrierten Gesamtlösung im Rahmen des Änderungsmanagements
- **Betriebsphase:** Nutzung der Gesamtlösung
- **Supportphase:** Service-Prozesse zur Unterstützung einer reibungsfreien Nutzung der Gesamtlösung sowie Support im Störfall

In der Inbetriebnahme- und Betriebsphase ist für die Gesamtlösung aus Gründen der Komplexitätsreduktion im Regelbetrieb durch die Stammorganisation im Idealfall keine objektorientierte Betrachtung notwendig.

Vielmehr kapselt das Gesamtsystem die darunterliegende Komplexität (Black-Box-Betrachtungsweise aus Sicht des Anwendenden). Für den Support hingegen kann eine Aufschlüsselung der Teilkomponenten analog zur Systemstruktur erforderlich sein, bspw. um Teilkomponenten auf verschiedene Supportfunktionen zu verteilen. Jedoch ist auch hier ausgehend vom Gesamtsystems eine Gesamtverantwortung zu definieren.

Nach der objekt- und phasenorientierten Strukturierung der Gesamtlösung kann eine funktionsorientierte Zuständigkeit nach Objekt und Phase mittels der Farbgebung der Teilkomponenten sichtbar gemacht werden. Somit lassen sich vollständige Zuständigkeiten aller Objekte entlang des Systemlebenszyklus systematisch ermitteln. Ist dies gewährleistet, können die Objekte der ersten drei Phasen unter gleichzeitiger Berücksichtigung von phasen-, objekt- und funktionsorientierten Aspekten in Teilprojekten gebündelt werden. Hierzu werden folgende Empfehlungen nahegelegt:

- Minimieren von Projektrisiken durch das Bilden separater Vorprojekte (hierbei Reduktion des Vorbereitungsaufwands durch abgegrenzten Betrachtungsumfang)
- Reduktion der Anzahl von Schnittstellen zwischen Abteilungen durch die Bildung cross-funktionaler Projektteams
- Nutzung des Phasenübergangs von der Entwicklungsphase über Integrationsphase zur Neuausrichtung des Projektteams (Transfer der Lösung von der Projektorganisation an das Servicemanagement der Stammorganisation)

Die entwickelten Teilprojekte und ihre Abhängigkeiten stellen die fertige Projektstruktur dar, welche die Basis für die weitere Projektplanung bildet. Hierzu gehören insbesondere die folgenden Aufgaben:

- Aufwands- und Kostenplanung
- Terminplanung
- Personaleinsatz
- Betriebsmitteleinsatzplanung

Es sei darauf hingewiesen, dass zu diesen Aufgaben gehörende Methoden in einschlägigen Projektmanagementfachbüchern detailliert beschrieben sind [71].

Make-or-Buy-Entscheidung

Für die Realisierung der im Projektplan strukturierten Teilprojekte, kommen grundsätzlich sowohl interne als auch externe Auftragnehmer (AN) in Betracht. Zur Systematisierung des Make-or-Buy-Entscheidungsprozesses,

wurde basierend auf einem aus der Fabrikplanung bekannten Vorgehens zur Festlegung der Fertigungstiefe von Burggräfer und Schuh eine Methode entwickelt [221], Bild 49.

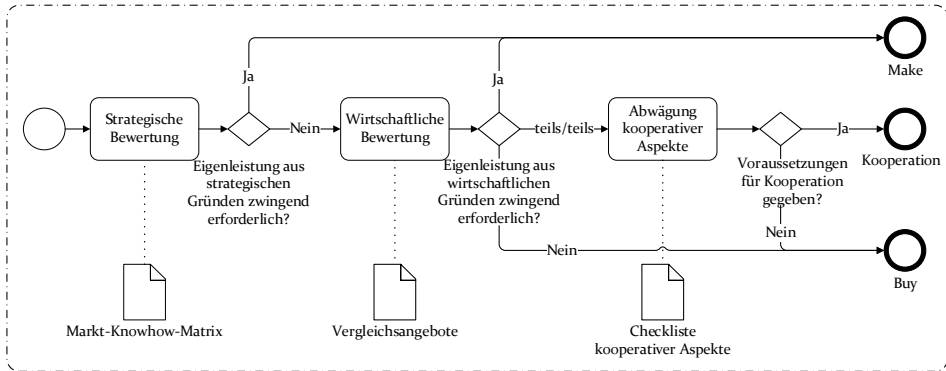
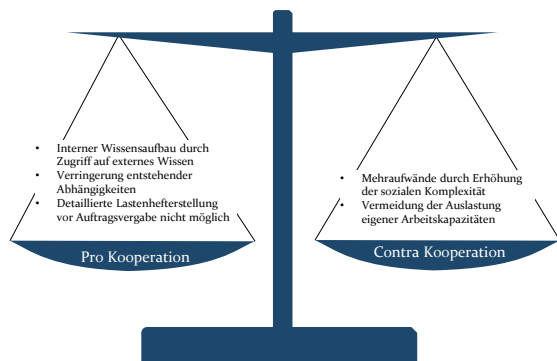


Bild 49: Methode zur systematischen Make-or-Buy-Entscheidung; Vorgehen nach [221]

Das Vorgehen gliedert sich in drei Teilschritte, welche in der Reihenfolge nach strategischen, anschließend wirtschaftlichen und zuletzt kooperativen Aspekten bewertet werden. Zur strategischen Bewertung eignet sich Buy-Make-Matrix (siehe Bild 50 (a)). Die wirtschaftliche Bewertung kann formell anhand von Vergleichsangeboten oder informell anhand von Erfahrungswerten erfolgen. Bei der Abwägung von kooperativen Aspekten werden Vor- und Nachteile gegeneinander aufgewogen (siehe Bild 50 (b)).

Stärken des Unternehmens	B Make or Buy Supportlösungen • Make: Vorhandensein freier Kapazitäten im eigenen Unternehmen • Buy: Wirtschaftlichkeit	A Make Kernlösungen • Wissen intern belassen • Vermeiden von Abhängigkeiten in Kernkompetenzfeldern
	C Buy Outsourcing • Fokussierung auf Kernprozesse • Zugriff auf Wissen des Providers	D Make or Buy Supportlösungen • Make: Erschließung von Potentialen für internen Wissensaufbau • Buy: Wirtschaftlichkeit
Differenzierung im Wettbewerb		

(a)



(b)

Bild 50: Buy-Make-Matrix zur strategischen Bewertung von (Teil-)Projekten i.A.a. [208] (a) sowie Argumente für und gegen die Bildung von Kooperationsprojekten (b)

Mittels der Buy-Make-Matrix in Bild 50 (a) werden Kern-, Support- sowie Outsourcing-Lösungen anhand der Dimensionen *Differenzierung im Wettbewerb* und *Stärken des Unternehmens* unterschieden. Kernlösungen

sichern den Wettbewerbsvorteil, weshalb das Wissen in produzierenden Unternehmen verbleibt und das Aufbauen von Abhängigkeiten zu vermeiden ist. Lösungen vom Typ B sollten, sofern die Wirtschaftlichkeit gegeben ist, outsourct werden. Arbeitskapazitäten des eigenen Unternehmens sollten nur bei einem vorhandenem Kapazitätsüberschuss eingesetzt werden. Hingegen stellt der Potentialaufbau bei der Entwicklung von Lösungen des Typs C ein strategisches Argument für eine Make-Entscheidung dar. Für Lösungen des Typs D mit einem niedrigen Differenzierungspotential sowie außerhalb des Kernkompetenzbereichs ist eine Buy-Entscheidung aus strategischer Sicht zu befürworten.

Für die Abwägungen der Kooperationsbildung werden in Bild 50 (b) die beiden jeweils wichtigsten Argumente für und gegen eine Kooperation miteinander abgewogen. Die Bildung von Kooperationen birgt die Chance des Knowhow-Aufbaus. Dies wiegt insbesondere für Projekte des Typs D schwer, da somit entstehende Abhängigkeiten teilweise reduziert werden können. Für ein reines Outsourcing und somit gegen die Kooperationsbildung sprechen geringere Aufwände aufgrund einer weniger komplexen Projektstruktur und die Vermeidung einer weiteren Auslastung eigener Arbeitskapazitäten bei bestehender Auslastung.

Nach Durchführung der Methode zur Make-or-Buy-Entscheidung für jedes Teilprojekt ist der vorläufige Projektplan mit einer Sourcing-Strategie angereichert und somit vollständig.

4.3.3 Vorbereitung von Digitalisierungsprojekten

Die Vorbereitung von Digitalisierungsprojekten ist abhängig von der Projektkonstellation, welche wiederum von der im Projektplan definierten Sourcing-Strategie je Teilprojekt beeinflusst wird. Da bei externen Aufträgen, die Einflussnahme des auftraggebenden Unternehmens zur Projektlaufzeit stark begrenzt ist (vgl. Bild 17), ist in diesem Fall eine rechtsverbindliche Vertragsgrundlage zwischen den beiden Parteien herzustellen. Dies geschieht mittels eines Pflichtenheftes. In Fällen, in denen kein weitgehend vollständiges Pflichtenheft vor der Beauftragung erstellt werden kann, sind Projektkonstellationen mit externen AN aufgrund der fehlenden Weisungsbefugnis nur bedingt geeignet. Es lassen sich zwei grundlegende Arten von Beziehung zwischen Auftraggeber (AG) und AN klassifizieren:

- **Klassische AG-AN-Beziehung:** Das zu erbringende Projektergebnis ist vor Auftragsvergabe in einem Pflichtenheft geregelt.
- **Agile AG-AN-Beziehung:** Das vom AN zu erbringende Projektergebnis wird während der Projektlaufzeit spezifiziert.

Die Festlegung der Art der AG-AN-Beziehung hat zeitlichen sowie aufwandstechnischen Einfluss auf die Projektvorbereitung, wie Bild 51 qualitativ illustriert.

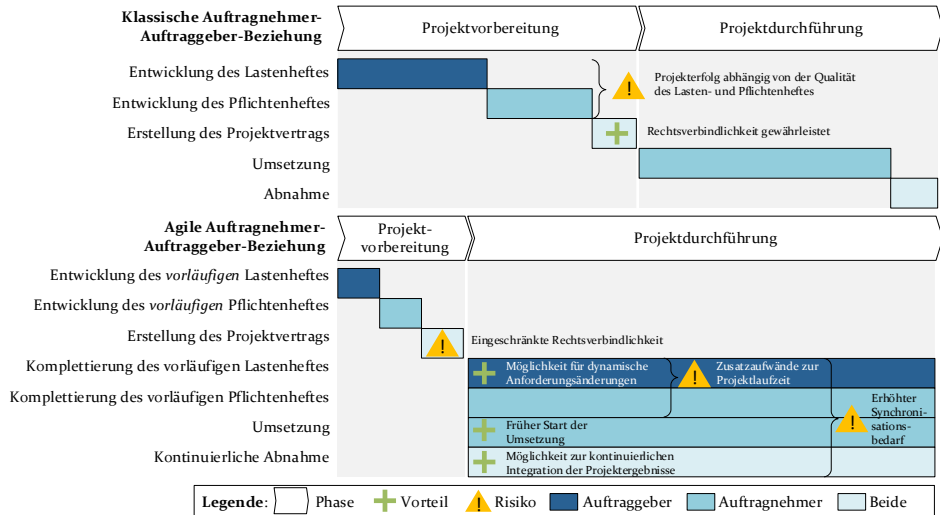


Bild 51: Gantt-Diagramme zum Vergleich einer klassischen sowie einer agilen Auftraggeber-Auftragnehmer-Beziehung

Der Vergleich der schematischen Gantt-Diagramme beider AG-AN-Beziehungen zeigt, dass sich Aufwände der Projektvorbereitung bei der *agilen* AG-AN-Beziehung in die Durchführungsphase verlagern. Bei der *klassischen* AG-AN-Beziehung sind höhere Aufwände vor Beginn der eigentlichen Umsetzungsarbeit aufgrund der Erstellung vollständiger Lasten- und Pflichtenhefte erforderlich. Der Projekterfolg ist in diesem Fall maßgeblich von der Qualität beider Dokumente abhängig. Der wesentliche Vorteil dieser AG-AN-Beziehung liegt in der rechtsverbindlichen Grundlage, welche eine externe Projektvergabe nach Projektkonstellationsvariante 3 (vgl. Bild 17) ermöglicht. Die Erstellung vollständiger Lasten- und Pflichtenhefte birgt unter Umständen jedoch erhebliche Aufwände, sodass diese bei der Festlegung der Projektstruktur ggf. in einem dedizierten Vorprojekt zu berücksichtigen ist. Zudem stellt die Erstellung eines vollständigen Lastenheftes bei komplexen Aufgabenstellungen kein realistisches Szenario dar. In diesem Fall ist eine agile Kollaborationsform zwischen AG und AN ein möglicher Behilf. Dadurch ist eine spätere Fertigstellung des Lasten- und Pflichtenheftes zur Projektlaufzeit möglich. Neben dem Vorteil des früheren Projektstarts, behält sich der AG eine gewisse Flexibilität bzgl. der Anforderungsdefinition vor. Diese Flexibilitätsgewinne gehen jedoch mit zusätzlichen Arbeits- und Synchronisationsaufwänden bei der Umsetzung

einher. Weiterhin ist die Rechtsverbindlichkeit dieser Kollaborationsform nur eingeschränkt gewährleistet, sodass diese AG-AN-Beziehung bei Projektkonstellationsvarianten 1 und 2 (vgl. Bild 17) sinnvoll erscheinen. Die Eignung der AG-AN-Beziehung in Abhängigkeit von Projektkonstellationen sind zur Übersicht und Verdeutlichung in Bild 52 dargestellt.

		Projektkonstellation		
		Typ 1: Intern	Typ 2: Intern\ Extern	Typ 3: Extern
AG-AN-Beziehung	Klassisch	●	●	●
	Agil	●	●	○

● Geeignet ○ Ungeeignet

Bild 52: Eignungsmatrix zur Festlegung des AG-AN-Beziehungstyps in Abhängigkeit von der angestrebten Projektkonstellation

Hinweis: Die Wahl einer *klassischen* bzw. *agilen* AG-AN-Beziehung entspricht nicht zwangsläufig der angewandten Projektmanagement- bzw. Entwicklungsmethode des Projektleitenden/ -teams auf der AN-Seite.

Im aktuellen Unterkapitel wird der Prozess der Lastenhefterstellung und darauf aufbauend der Prozess der Projektanbahnung zur Gewährleistung der Durchgängigkeit der Methodik illustriert. Projekte mit klassischer AG-AN-Beziehung erfordern die Generierung von Lastenheften im Rahmen der Projektvorbereitung. Bei agilen AG-AN-Beziehungen kann die Komplettierung des Lastenheftes zur Projektlaufzeit erfolgen. Es wird jedoch empfohlen, auch in diesem Fall die Lastenhefterstellung explizit durchzuführen.

Lastenhefterstellung

DIN 69901 definiert das *Lastenheft* als die „vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines ANs innerhalb eines (Projekt-)Auftrags“ [97]. In Bezug auf Digitalisierungsprojekte sind neben den spezifizierten Leistungen auch sogenannte *Design Constraints* (Design-Einschränkungen) im Lastenheft vorzugeben, um die anschließende Integration und den darauffolgenden Betrieb der Lösung gewährleisten zu können. Abgesehen von diesen notwendigen Einschränkungen ist das Lastenheft so lösungsneutral wie möglich zu formulieren.

Das *Pflichtenheft* ist definiert als die „vom Auftragnehmer erarbeiteten Realisierungsvorgaben aufgrund der Umsetzung des vom Auftraggeber vorgegebenen Lastenhefts“ [97]. Für die Entwicklung von Software und technischen Systemen sieht der IEEE Standard die Entwicklung einer sog. *Requirements Specification* vor, welche die Inhalte beider Dokumente in eine

einheitliche Struktur integriert. Auf Basis des in Kapitel 4.3.1 entwickelten Lösungskonzeptes kann der AG bei der Lastenhefterstellung die Forderungen und einhergehende Design-Einschränkungen ableiten. Die Systemanforderungen werden in IEEE 29148 nach verschiedenen Kategorien unterschieden [222]. Bild 53 zeigt eine Zuordnung der Informationselemente des 4+1-Sichtenmodells (vgl. Bild 45) auf die Gliederungsstruktur der Systems Requirement Spezifikation nach IEEE 29148.

In der *Einleitung* der Systemspezifikation werden der Einsatzzweck, Funktionsumfang und ein Überblick des zu entwickelnden Systems beschrieben. Diese Informationen lassen sich aus den Szenarienbeschreibungen sowie den Artefakten des Logical Views entnehmen.

Functional Requirements entsprechen einer vollständigen Auflistung aller Nutzerfunktionalitäten des Logical Views.

Usability Requirements gehen aus den Ergonomievorgaben des Logical Views und räumlichen Design-Einschränkungen des Physical Views hervor.

Performance Requirements lassen sich von den definierten Leistungsmerkmalen der Informationsflüsse des Process Views ableiten.

Interface Requirements folgen aus den im Process Views dargestellten Schnittstellen.

Information Management Requirements umfassen die Generierung, Verarbeitung, Übertragung und Speicherung von Daten und gehen aus einer kombinierten Betrachtung des Process sowie des Physical Views einher.

Policy and Regulation Requirements entsprechen den IT- bzw. OT-Policies, welche sich durch die unternehmensspezifische Governance und gesetzliche Vorgaben begründen.

System Life Cycle Sustainment Requirements und weitere Anforderungen der Lieferung und des Transports sind auf Basis der im Lifecycle View definierten Verantwortlichkeiten zu definieren. Die Schere der Anforderungen kann hierbei von langen Serviceintervallen bis zu einer vollständigen Systemübergabe (bei Softwareprojekten inkl. Code-Überlassung) nach Projektabschluss reichen.

Gliederungsstruktur der System Requirements Specification nach IEEE 29148:2018	Zuordnung der Informationselemente aus Ideensteckbrief & 4+1-Sichtenmodell
1. Introduction	-
1.1 System purpose	Ideensteckbrief: Anlass & Wert
1.2 System scope	Logical View: Nutzerfunktionalitäten
1.3 System overview	Logical View: Logische Systemarchitektur
1.3.1 System context	Logical View: Systemgrenzen
1.3.2 System functions	Logical View: Systemfunktionalitäten
1.3.3 User characteristics	Logical View: Nutzergruppen
2. References	-
3. System requirements	-
3.1 Functional requirements	Logical View: Nutzerfunktionalitäten
3.2 Usability requirements	Logical & Physical View: Funktionalitäten und Ergonomie
3.3 Performance requirements	Process View: Leistungsmerkmale (Zeit, Material und Informationsflüsse)
3.4 Interface requirements	Process View: Systemschnittstellen
3.4.1 External interface requirements	Process View: Systemschnittstellen
3.4.2 Internal interface requirements	Process View: Systemschnittstellen
3.5 System operations	Process View: Ablaufverhalten
3.6 System modes and states	Process View: Zustandsautomat
3.7 Physical characteristics	Physical View: Verteilkonzept
3.8 Environmental conditions	Physical View: Umgebungseinschränkungen
3.9 Security requirements	Physical View: Funktionale Sicherheit
3.10 Information management requirements	Process & Physical View: Netzwerk- und Informationsverarbeitungskonzepte
3.11 Policy and regulation requirements	Process & Physical View: OT-Policies & gesetzliche Vorgaben
3.12 System life cycle sustainment requirements	Life-Cycle View: Zuständigkeiten und tech. Abhängigkeiten
3.13 Packaging, handling, shipping and transportation requirements	Life-Cycle View: Zuständigkeiten
4. Verification (parallel to subsections in Section 3)	-
5. Appendices	-
5.1 Assumptions and dependencies	Process, Physical & Lifecycle View: Technische Abhängigkeiten und Voraussetzungen
5.2 Acronyms and abbreviations	-

Bild 53: Zuordnung der Informationselemente methodisch entwickelter Konzepte (vgl. Kapitel 4.3.1) gemäß der Gliederungsstruktur der Systems Requirements Specification nach IEEE 29148 [222]

Projektanbahnung zwischen AG und AN

Das idealtypische Vorgehen vom Lastenheft bis zur Erteilung des Projektauftrags ist in Bild 54 visualisiert.

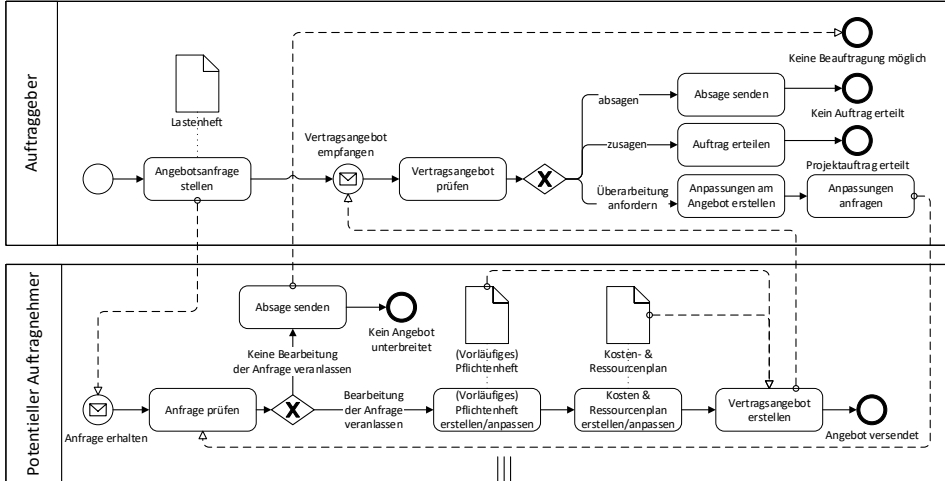


Bild 54: Kollaborationsdiagramm – Vom Lastenheft zum Projektauftrag

Das Bild 54 zeigt einen idealtypischen Ablauf vom Lastenheft bis zur Projektbeauftragung. Im ersten Prozessschritt übermittelt der AG das Lastenheft im Rahmen einer Angebotsanfrage an den potenziellen AN. Nach Eingang der Anfrage entscheidet der AN anhand einer Prüfung, ob die für die Angebotserstellung benötigten Aufwände in Kauf genommen und ein Angebot unterbreitet wird. Das Pflichtenheft dient bei Vertragsschließung als die rechtsverbindliche Grundlage für zu erbringende Leistungen. Hinzugefügt sei, dass dieses Dokument für beide Vertragspartner die essenzielle Grundlage für jegliche Kollaboration während der Projektlaufzeit darstellt.

Der AN prüft die eingegangenen Auftragsangebote und kann diese akzeptieren, ablehnen oder Änderungen anfordern. Bei Letzterem beginnt ein iterativer Überarbeitungsprozess gemäß den geforderten Anpassungen. Final ist ein Projektvertrag aufzusetzen, welcher ein Pflichtenheft, einen Meilensteinplan, relevante Fertigstellungstermine und eine Risikobetrachtung umfasst. Mit beidseitiger Unterzeichnung des Vertrags wird der jeweilige Projektauftrag erteilt und das Projekt somit initialisiert.

4.3.4 **Zwischenfazit zur Analyse-Phase**

Die Projektvorbereitung spannt die Rahmenbedingungen für die anschließende Projektdurchführung auf. Aufgrund dieser kritischen Rolle für den weiteren Vorhabenserfolg, ist die Erreichung einer hohen Durchführungsqualität dieses Aufgabenkomplexes von besonderer Bedeutung. Konkret wurden hierzu zwei wesentliche Problemmerkmale im Produktionsumfeld identifiziert, welche den Handlungsbedarf dieses Kapitels darstellen. Erstens, fehlende domänenüberspannende Betrachtung des Gesamtlösungskonzeptes. Zweitens, unzureichende Strukturierung der geplanten Gesamtlösung in Teilprojekte und deren Formalisierung in Projektaufträgen. Mit der Analyse-Phase werden zur Behebung dieser beiden Mängel zwei konkrete Beiträge geleistet:

1. Eine Methode zur interdisziplinären Lösungskonzeptentwicklung
2. Eine Methode zur Strukturierung und Planung von Projekten

Die Ausgangsbasis für die Lösungskonzeptentwicklung stellen die in der Define-Phase erfassten Lösungsgrobkonzepte dar. Die Verfeinerung dieser Lösungskonzepte erfolgt in zwei Dimensionen. Die erste Dimension bilden die vier Sichten (Logical , Process, Physical und Lifecycle View), welche in einem modifizierten 4+1-Sichtenmodell nach Kruchten [205] definiert sind. Die zweite Dimension stellen die involvierten Fachdomänen (Fabrikplanung, IT, OT) dar. Bestehende domänenspezifische Methoden werden zur Spezialisierung werden je Phase innerhalb der Fachdomänen systematisiert. Für die interdisziplinäre Zusammenarbeit werden Verantwortlichkeiten, Informationsartefakte und Modellierungssprachen definiert.

Ausgehend von den ganzheitlichen Lösungskonzepten wird im ersten Schritt der Projektplanung eine ganzheitliche Projektstruktur entwickelt. Hierzu wird ein Modell vorgestellt, welches eine phasen-, objekt- und funktionsorientierte Strukturierung des Projektes ermöglicht. Von dieser lassen sich Projektpläne generisch ableiten. Der weiteren Projektvorbereitung wird eine Make-Buy-Entscheidung je (Teil-)Projekt vorangestellt. Um eine hohe Durchführungsqualität des Entscheidungsfindungsprozesses zu gewährleisten, wird dieser methodisch angeleitet. Die nachfolgenden Schritte von der Finalisierung der Projektvorbereitung über die Spezifikation einer verbindlichen Auftrags- bzw. Vertragsgrundlage bis hin zur Auftragserteilung werden in Abhängigkeit der AG/AN-Konstellation (intern/extern) und der gewählten AG/AN-Beziehung (klassisch, agil) betrachtet. Es entsteht ein vollständiges und durchgängiges Vorgehen von der Vorbereitung von Digitalisierungsaktivitäten bis hin zu deren Beauftragung.

4.4 Implement-Phase

In der vierten Phase der DMAICS-Methodik wird die Durchführung von Digitalisierungsprojekten systematisiert. Hierbei gilt es die Eignung des vorgestellten Verfahrens zu prüfen (vgl. Bild 24). Den mit der Durchführung von Digitalisierungsprojekten verbundenen praktischen Problemmerkmalen und Forschungsdefiziten (vgl. These 5 aus Bild 23) wird wie folgt begegnet:

- Systematischer Umgang mit *Unsicherheiten während der Projektlaufzeit* sowie *dynamische Herausforderungen* volatiler Technologien durch die Verwendung agiler Arbeitsweisen (PM 1.2, PM 3.3)
- Aufwandsoptimale Synchronisation zwischen Digitalisierungsprojekten mittels adäquater *Gestaltung von Kommunikationsstrukturen* (PM3.2)
- Entscheidungsmodelle zur Methodenauswahl und *Spezifikation der auszutauschenden Informationen* für das Projektmanagement (FD1.2, FD2.1)

Das Prozessmodell der Implement-Phase ist in Bild 55 dargestellt.

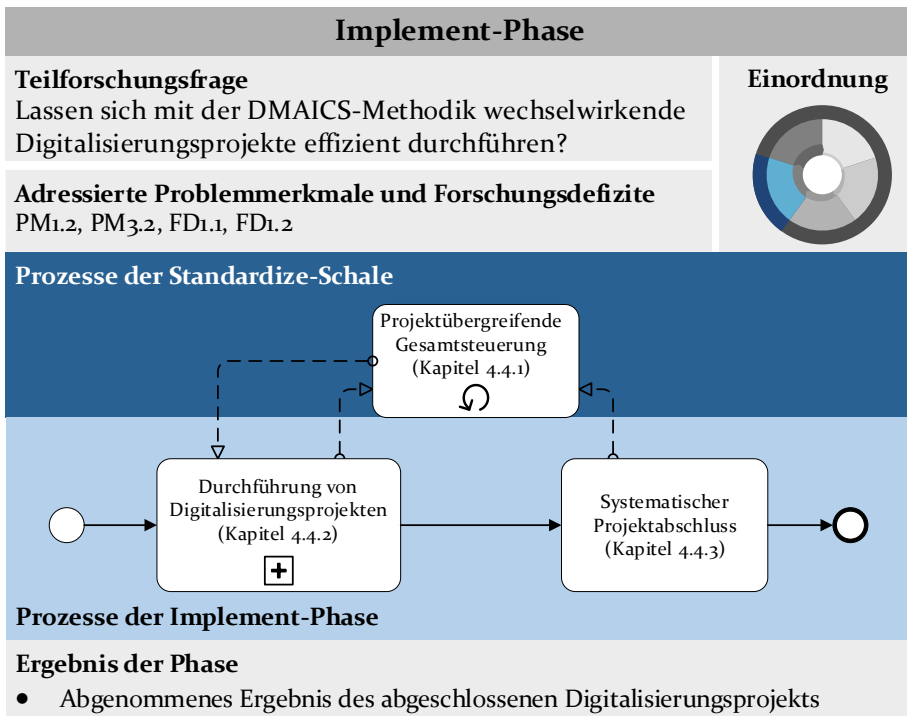


Bild 55: Vorgehen und Inhalt der Implement-Phase

4.4.1 Projektübergreifende Gesamtsteuerung

Die Durchführung einer projektübergreifenden Steuerung wird häufig in Form eines dedizierten Portfolio- oder Programmmanagements realisiert. Die Aufgaben dieser Funktion sind in etablierten Projektmanagementmethoden beschrieben und in Kapitel 2.2.6 zusammengefasst. Im Kern verfolgt ein Programmmanagement folgende Aufgaben:

- Sicherstellung der Einhaltung normativer Vorgaben durch die untergeordneten Einzelprojekte
- Minimierung des Reporting- und Synchronisationsaufwands zwischen Einzelprojekte

Darüber hinaus ergeben sich durch das übergeordnete Projektmanagement weitere Verbesserungspotentiale zur Steigerung der Gesamteffektivität und -effizienz bei der Umsetzung von Digitalisierungsaktivitäten. Eine Systematisierung dieser Chancen, soll bei der bedarfsgerechten Ausgestaltung einer projektübergreifenden Steuerung unterstützen. Von den identifizierten Verbesserungspotentialen lassen sich die erforderlichen Informationsflüsse ableiten und im Rahmen des Multiprojektmanagements in geordneter Weise etablieren.

Bei der Identifikation von Chancen ist der Betrachtungsbereich der übergeordneten Projektsteuerung festzulegen. Für diesen kommen Digitalisierungsprojekte mit *agiler* AG-AN-Beziehung in Betracht (vgl. Bild 52). Projekte mit klassischer AG-AN-Beziehung bieten nur begrenzt, im Falle von extern vergebenen Projekten möglicherweise gar keine, Flexibilität zur übergeordneten Steuerung. Vor dem Hintergrund des Betrachtungsbereichs sind die in Bild 56 visualisierten Chancen der übergeordneten Projektsteuerung zu prüfen.

Hinweis: Bei extern vergebenen Projekten erfolgt eine etwaige projektübergreifende Steuerung auf AN-Seite. Die in diesem Kapitel gezeigten Inhalte spiegeln die Aufgaben aus AG-Sicht wider, welche jedoch analog auch für die AN-Seite gültig sind.

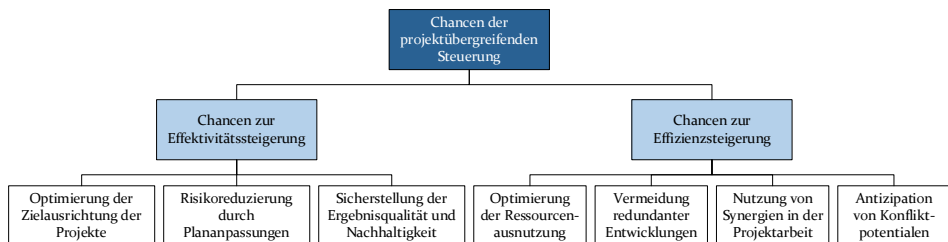


Bild 56: Chancen der projektübergreifenden Steuerung von Digitalisierungsaktivitäten

Wie Bild 56 zeigt, lassen sich die Chancen der projektübergreifenden Steuerung in die zwei Arten der Effektivitäts- und der Effizienzsteigerung unterteilen.

Die erste Chance zur Erhöhung der Effektivität entsteht durch erforderliche Justierungen von Einzelprojektzielen auf dynamisch veränderliche Unternehmensziele (moving targets). Diese Chance besteht immer dann, wenn die projektübergreifende Steuerung zusätzliche Informationen bzgl. taktischer oder strategischer Zielausrichtungen des Unternehmens einsteuern kann.

Die zweite Chance zur gesteigerten Effektivität stellt die Risikoreduzierung dar. Agile Projekte unterliegen einem Lernprozess, in welchem bisher unerkannte Risiken durch den Wissenszugewinn identifiziert werden können. Eine zentrale Erfassung von Risiken, welche projektübergreifende Plananpassungen erfordern können, sind im Rahmen der übergeordneten Steuerung als Chance zu begreifen.

Die dritte Chance der Effektivitätssteigerung äußert sich als Sicherstellung der Ergebnisqualität und Nachhaltigkeit, sofern sich diese durch übergreifende Mechanismen, bspw. durch Projektaudits im Rahmen einer Projektgovernance, effektiver gestalten lassen.

Die Chancen der Effizienzsteigerung liegen in einer Optimierung der Ressourcenausnutzung, indem eine Über- bzw. Unterforderung von Projektmitarbeitenden vermieden wird. Ist dies durch eine projektübergreifende Ressourcenallokation zu bewerkstelligen, ist die Erfassung der Ressourcenauslastung projektübergreifend sinnvoll.

Die Vergrößerung des Betrachtungsraums von einzelnen auf mehrere Projekte ermöglicht zudem die Vermeidung von redundanten Entwicklungen. Kann diese aufgrund des emergenten Charakters agiler Projekte nicht in der vorbereitenden Planung vollständig ausgeschlossen werden, ist eine zentrale Steuerung von (Teil-)Projektzielen zu empfehlen.

Eine weitere Chance zur Effizienzsteigerung bietet die Synergienutzung bei der Projektarbeit. Können durch die Zentralisierung von wiederkehrenden Supportaufgaben die Summe der Gesamtaufwände der Einzelprojekte reduziert werden, ist diese als sinnvoll zu erachten.

Die vierte Chance der Effizienzsteigerung zeigt sich durch die Antizipation von Konflikten zwischen Projekten. Diese Chance ist zutreffend, sofern Ziel- oder Ressourcenkonflikte zwischen Projekten denkbar sind.

Basierend auf den identifizierten Chancen der projektübergreifenden Steuerung, sind die erforderlichen Informationen seitens der Kund:innen (z.B. taktische und strategische Unternehmensziele) sowie von den (Teil-)Projektleitenden (Projektstatus, Projektrisiken, Terminpläne und Ressourcenauslastung) abzuleiten und in schlanken Reportingstrukturen zyklisch einzufordern.

4.4.2 Durchführung von Digitalisierungsprojekten

Das aktuelle Kapitel befasst sich mit der Durchführung von Digitalisierungsprojekten, welche im engeren Sinne von der Projektleitung verantwortet wird. Je nach Projektkonstellation handelt es sich bei der Projektleitung um eine intern bzw. extern vergebene Rolle aus Sicht des auftraggebenden Unternehmens (vgl. Bild 17). Die Projektleitung dient als Stellvertretung zwischen AG bzw. Kunde und dem Entwicklungsteam. Etablierte Projektmanagementmethoden (z.B. Prince2, PMBOK, IPMA ICB) decken das Aufgabenspektrum der Projektleitung bereits detailliert ab (vgl. Kapitel 2.2.6). Das aktuelle Kapitel systematisiert ergänzend die Festlegung effizienter Kommunikationsstrukturen, die Festlegung der Projektteamtopologien und existierende Methoden und Werkzeuge entlang des Entwicklungszyklus von Digitalisierungslösungen. Die Inhalte dieses Unterkapitels werden in Bild 57 in einem Kollaborationsdiagramm der Projektdurchführung zwischen AG, der Projektleitung und dem Projektteam eingeordnet.

In Abhängigkeit von der im Rahmen der Projektvorbereitung definierten AG-AN-Beziehung können zusätzliche Kundenanforderungen während der Projektlaufzeit gestellt werden. Diese müssen von der Projektleitung geprüft und im Pflichtenheft ergänzt werden. Auf Basis des Pflichtenheftes plant die Projektleitung das Projekt und steuert das Projektteam. In umgekehrter Richtung liefert das Projektteam Informationen über den Entwicklungsfortschritt an die Projektleitung zur Planung des weiteren Projektverlaufs sowie zur Berichterstattung an den Projektkunden. Für diesen Informationsfluss sind von der Projektleitung effiziente *Kommunikationsstrukturen* zu definieren. Zur Befähigung einer effizienten Entwicklungsarbeit werden in diesem Kapitel Projektteamtopologien mittels eines Modelansatzes gebildet. Weiterhin wird eine Systematisierung bestehender Entwicklungsmethoden und -werkzeuge entlang des Entwicklungszyklus von Digitalisierungslösungen gegeben.

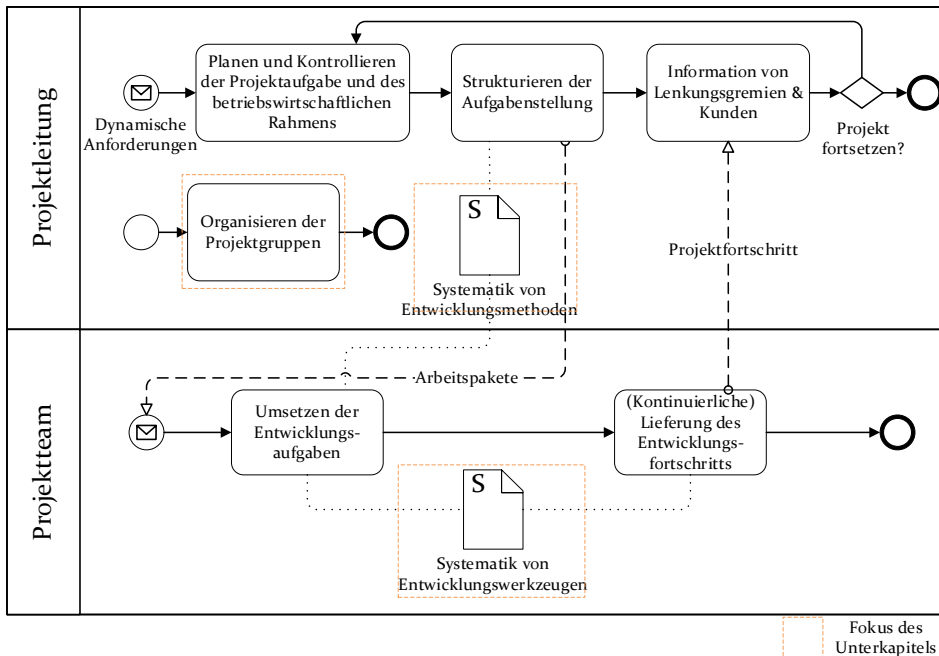


Bild 57: Kollaborationsdiagramm bei der Projektdurchführung zur Einordnung der Kapitelinhalte

Organisation von Projektgruppen

Die Teamzusammensetzung hat maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz des Entwicklungsprozesses. Die Teameffizienz ergibt sich aus der Effizienz der einzelnen Teammitglieder sowie der Effizienz bei der Zusammenarbeit. Letztere bedingt sich insbesondere durch die Kommunikationsstruktur, die nach Rosenstiel [223], wie in Bild 58 dargestellt, in fünf Strukturtypen unterschieden werden.

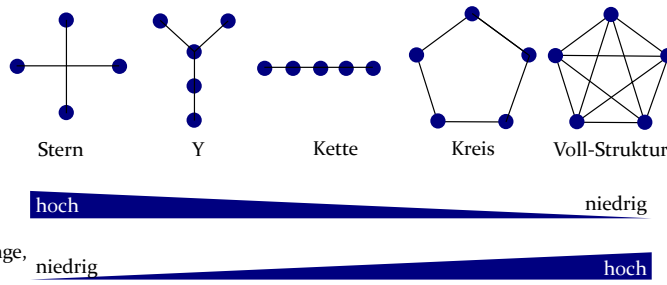


Bild 58: Kommunikationsstrukturen von Gruppen sowie qualitative Implikationen i.A.a. [223]

Es scheint offensichtlich, dass für die Entwicklung von Softwarelösungen dezentrale Strukturen, autonom agierender Teams am schlagkräftigsten sind. Eine zusätzliche Cross-Funktionalität des Teams stellt die Betrachtung verschiedener Perspektiven sicher. Jedoch ist dieses Idealbild nicht skalierbar, da die Anzahl an Kommunikationsvorgängen exponentiell mit der Teammitgliederzahl ansteigt. Ein weiteres Problem bei Digitalisierungsprojekten stellt die hohe kognitive Belastung aufgrund der Themenkomplexität an das Team dar. Beide Probleme lassen sich durch die Bildung mehrerer interoperablen Teams beheben. Skelton und Pais unterscheiden hierbei insgesamt vier verschiedene Team-Topologien [224], welche in Bild 59 illustriert werden.

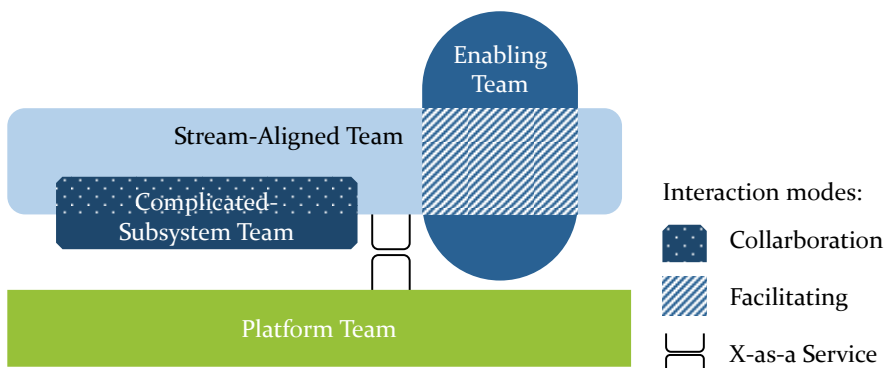


Bild 59: Team-Topologien und Interaktions-Moden [224]

Das zentrale Team, welches die Ende-zu-Ende-Verantwortung des Projektes trägt, ist das sog. Stream-Aligned Team. Zur Reduktion der kognitiven Anforderungen werden Teilaufgaben in Zusammenarbeit mit anderen Teams realisiert. Enabling Teams stellen eine kurzfristige Unterstützung bspw. in Form von Beratungsleistungen zur Anwendung einer neuen Technologie bereit. Platform Teams nehmen weitere Komplexität aus dem Projekt, indem sie generische Standardfunktionalitäten und Commodities in Services kapseln und aufwandsarm in das Projekt integrieren lassen. Hierzu zählen Services aus dem Bereich Data Warehousing ebenso wie Identity-Provider-Dienste. Complicated-Subsystem Teams sind Expertenteams, deren Spezialisierung in Stream-Aligned Teams nicht erreicht werden kann. Ein Beispiel stellen Data Scientists oder Experten im Umgang mit Legacy-Systemen dar. Durch die Spezialisierung in dedizierten Teams, kann das konzentrierte Wissen optimal mit mehreren Stream-Aligned Teams geteilt werden.

Die Kommunikationsstrukturen nach Rosenstiel [223] sowie die Team-Topologien nach Skelton und Pais [224] stellen einfache, aber wirksame Werkzeuge für die Projektleitung dar, um autonome und schlagkräftige Entwicklerteams zu formieren. Die folgende Checkliste dient als Gedankenstütze bei der Bildung von Projektteams zur Überprüfung:

- einer idealen Anzahl an Mitgliedern pro Team: 5-8
- des Vorhandenseins aller notwendigen Skills im Team
- einer sinnvoll gewählten Projektkomplexität (keine Über-, Unterforderung des Teams)
- der Delegation generischer Aufgaben an entsprechende Plattform Teams
- der Übertragung von Spezialaufgaben an Complicated-Subsystem-Teams
- der Verfügbarkeit von Beratungs- oder Befähigungsleistungen
- des Vorhandenseins dezentraler Kommunikations- und Kollaborationsmöglichkeiten zwischen Teammitgliedern

Systematische Auswahl der Entwicklungsmethode

Das erste Kriterium zur Festlegung der Entwicklungsmethode ist die Art der Lieferung des zu erzeugenden Projektergebnisses (im Folgenden auch Produkt genannt), welche üblicherweise bereits im Projektvertrag in Form eines Meilensteinplans definiert ist. Wie Bild 60 zeigt, lassen sich zwei grundlegende Lieferungsarten unterscheiden.

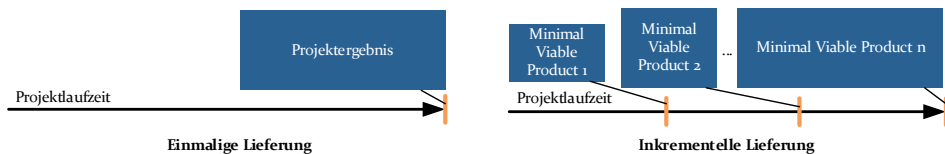


Bild 60: Gegenüberstellung der einmaligen sowie der inkrementellen Lieferung von Projektergebnissen

Bei einmaliger Lieferung wird das vollständige Projektergebnis am Projektende als Ganzes übergeben. Dies reduziert die Integrationsaufwände auf ein Minimum. Darüber hinaus führt diese Lieferungsart zunächst zu keinen weiteren Implikationen auf die Projektentwicklungsmethode. Ein Nachteil ist, dass zur Projektlaufzeit kein Kundenfeedback durch die Anwendung des Projektergebnisses einbezogen werden kann. Dies ist bei der zweiten Lieferungsart möglich, indem erste existenzfähige Produkte sog. *Minimal Viable Products* (MVPs) in inkrementellen Lieferungsschritten in Betrieb genommen werden. Hierbei entsteht jedoch mehrmaliger Integrationsaufwand. Zudem sind die Entwicklungsphasen nicht auf das

Endergebnis, sondern auf das Erreichen von Zwischenzuständen optimiert, wodurch weitere zusätzliche Aufwände entstehen können. Weiterhin impliziert eine, auf das Einbeziehen von Kundenfeedbacks abzielende inkrementelle Lieferung bereits die Wahl einer agilen Entwicklungsmethode.

Hinweis: Die inkrementelle Lieferung ist insbesondere typisch für die softwaretechnischen Bestandteile digitaler Lösungen.

Das zweite Kriterium, um eine Entwicklungsmethode auszuwählen, ist die Charakteristik der im Rahmen des Projekts zu bewältigenden Entwicklungsaufgabe. Stacey kategorisiert die vier Aufgabentypen: *chaotisch*, *komplex*, *kompliziert* sowie *einfach*, welche in Abhängigkeit von der Bekanntheit der Anforderungen und der Bekanntheit der Techniken und Methoden stehen [225]. Ferner definiert Dörner vier verschiedene Problem- bzw. Aufgabentypen, die nach der *Bekanntheit der Mittel* sowie der *Klarheit der Ziele* gegliedert werden [226]. In Bild 61 werden beide Konzepte miteinander kombiniert und zur Systematisierung von Entwicklungsmodellen und -methoden verwendet [P3].

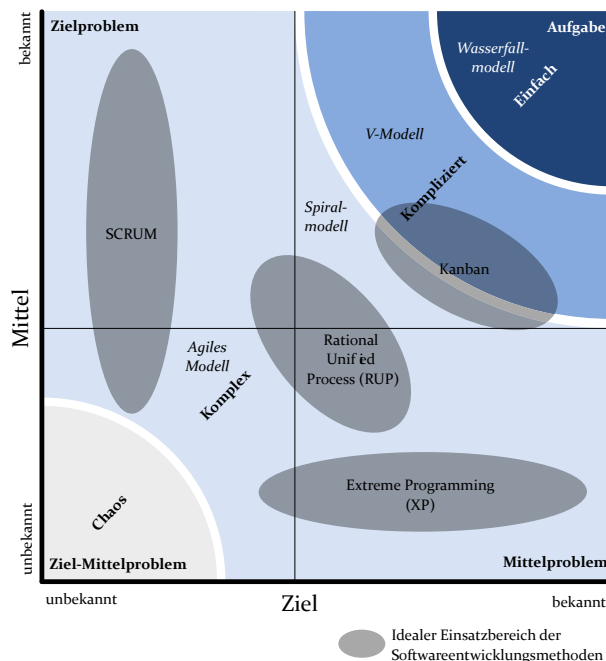


Bild 61: Systematisierung von Softwareentwicklungsmodellen und -methoden nach der Aufgaben- bzw. Problemtypisierung nach Dörner sowie Stacey i.A.a. [P3]

In Bild 61 werden die vier Entwicklungsmodelle Agiles, Spiral-, V- sowie Wasserfallmodell den Aufgabentypen nach Stacey [225] zugeordnet. Dem

Aufgabentyp *Chaos* kann kein Entwicklungsmodell zugeordnet werden. Vielmehr bedarf es Kreativitätsmethoden, wie bspw. dem *Design-Thinking*, um solche Situationen zu vermeiden. Zur Bewältigung komplexer Aufgaben, wie Digitalisierungsprojekten, eignet sich die Methode *SCRUM* insbesondere zum Auflösen der Zielprobleme mittels eines stark iterativen, teamzentrierten Ansatzes. Bei Mittelproblemen steht das Lösen konkreter Aufgabenstellungen im Vordergrund. Hierfür eignet sich die Methode des *Extreme Programmings*. Der *Rational Unified Process* ist eine iterative Entwicklungsmethode, bei welcher die Aufwände verschiedener paralleler Disziplinen der Softwareentwicklung (*Business Modelling, Requirements Engineering, Analysis & Design, Implementation, Test, Deployment, Configuration & Changemanagement, Projectmanagement* und *Environment*) gemäß der jeweiligen Projektphase angepasst werden. Für komplizierte Aufgaben ohne direkte Ziel- oder Mittelprobleme eignet sich die aus der Produktionsprozesssteuerung bekannte *Kanban*-Methode, welche im Kontext der Softwareentwicklung den inkrementellen Entwicklungsfluss durch das Visualisieren des Projektfortschritts bzw. etwaiger Bottlenecks optimiert. In Abgrenzung zur *SCRUM*-Methode ist die Größe der Inkremente flexibler definiert. Des Weiteren sind Planungs- und Implementierungsprozesse zeitlich stärker voneinander entkoppelt [227]. Sowohl bei der *Kanban*-, als auch bei der *SCRUM*-Methode durchlaufen einzelne Inkremente mehrmals die jeweiligen Entwicklungsphasen, wohingegen bei linearen Vorgehensweisen wie beim Wasserfallmodell das gesamte Produkt die Entwicklungsphase einmalig durchläuft.

Systematisierung von Entwicklungswerkzeugen

Der korrekte und vollständige Einsatz von Entwicklungswerkzeugen bestimmt maßgeblich die Effizienz von Digitalisierungsprojekten. Zur Bildung adäquater Werkzeug-, bzw. Technologiestacks wird im Folgenden eine Systematik vorgestellt. Die Systematisierung in Bild 62 erfolgt anhand des aus der Softwareentwicklung bekannten DevOps-Modells, welches die Entwicklung (engl. *development*, kurz: *Dev*) eng mit dem Betrieb (engl. *operations*, kurz: *Ops*) der Digitalisierungslösung verzahnt.

Die Form des DevOps-Modells stellt eine liegende Acht dar, welche den theoretisch unendlich oft wiederholenden Zyklus symbolisiert. Ebenso kann der Zyklus lediglich einmalig wie im Wasserfallmodell durchlaufen werden. Das Modell eignet sich somit zur Systematisierung der Entwicklungswerkzeuge unabhängig von der Entwicklungsmethode, da die grundlegenden Phasen identisch sind. Die Phasen des Modells können weiterhin nahezu analog auf die Lebenszyklusphasen beliebiger Systeme (bspw.

Produktionsanlagen) mit Ausnahme der Außerbetriebnahme sowie des Recyclings übertragen werden. Die softwarebasierte Automatisierung des Build- und des Test-Prozesses wird unter dem Konzept der *continuous integration* (CI) zusammengefasst. Dies wird durch die Virtualisierung der Hardware bspw. mittels Konzepte der Containerisierung ermöglicht. Das Konzept der kontinuierlichen Weitergabe von Projektfortschritten kann auf ähnliche Weise auf die anschließenden Release- sowie Deploy-Prozesse übertragen werden. Hierbei sind die zwei Vorgehensweisen *continuous delivery*, die eine automatisierte, jedoch final manuell getätigte Freigabe für das Deployment auf dem Produktivsystem vorsieht, sowie *continuous deployment*, bei welchem beide Prozesse automatisiert miteinander verknüpft sind, zu unterscheiden.

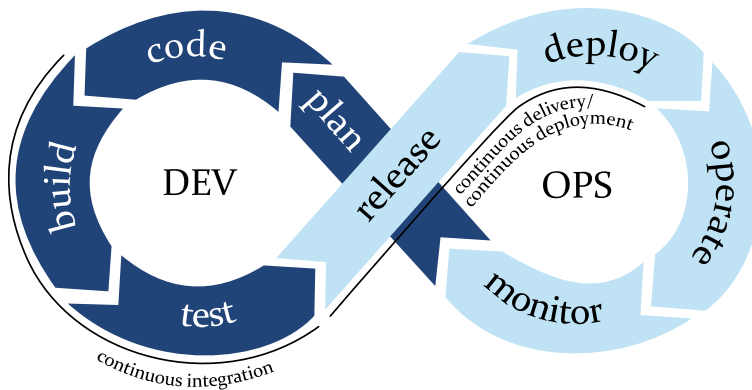


Bild 62: DevOps-Modell zur Veranschaulichung der Verzahnung von Entwicklung und Betrieb sowie Einordnung prozessunterstützender kontinuierlicher Integrations- und Deployment-Pipelines (CI/CD) i.A.a. [29, 228]

Hinweis: Der DevOps-Ansatz und das CI/CD-Konzept sind als Benchmark für die hochiterative Synchronisation zwischen Entwicklungs- und Betriebszustand zu verstehen. In Abhängigkeit von dem Anwendungsfall sind jedoch auch weitaus weniger iterative Vorgehensweisen für Digitalisierungslösungen im Produktionsumfeld ausreichend oder aufgrund von technischen Restriktionen nicht vollständig umzusetzen.

Die Systematik in Bild 63 zeigt durch die Aufschlüsselung der DevOps-Phasen auf die jeweiligen Kernaufgaben und die Zuordnung entsprechender Softwarekategorien die Bestandteile eines vollständigen DevOps-Toolstacks sowie relevanter Vertreter.

4 Detaillierung der DMAICS-Methodik

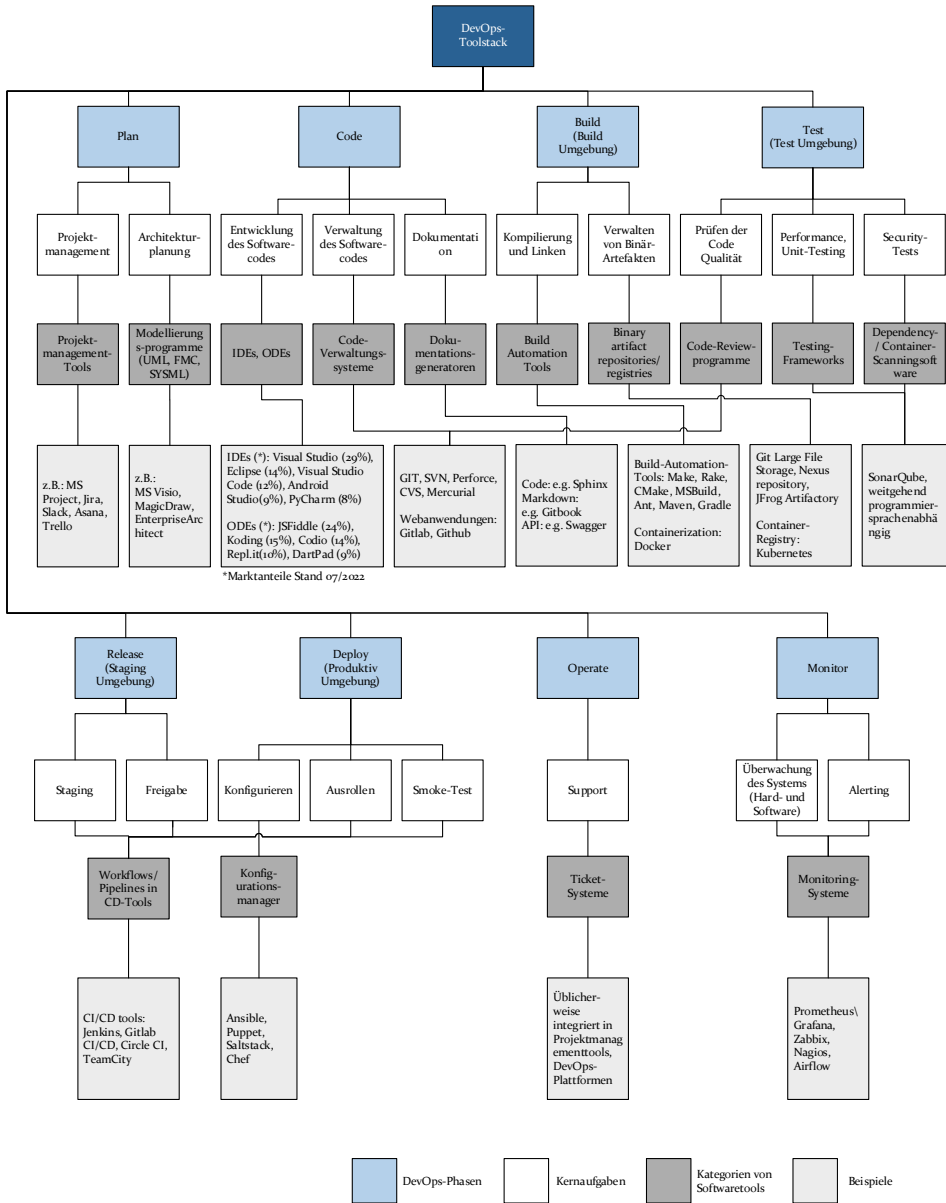


Bild 63: Systematisierung von Softwarewerkzeugen eines DevOps-Toolstacks; Marktanteile IDEs/ODEs [229, 230]

4.4.3 Projektabschluss

In den grundlegenden Bestandteilen entspricht das Vorgehen des Abschlusses von Digitalisierungsprojekten denen des allgemeinen Projektmanagements. Diese lauten:

- Produkt- bzw. Systemabnahme
- Projektabschlussanalyse
- Erfahrungssicherung
- Projektauflösung

Die vier Bestandteile und ihre Unter Aspekte werden im Folgenden mit Bezug auf Digitalisierungsprojekte wiedergegeben.

Produkt-/ Systemabnahme

Den ersten Unter aspekt der Abnahme stellt der *Abnahmetest* des Projektergebnisses dar. Das Projektergebnis, im Folgenden auch das Produkt, besitzt in Abhängigkeit vom Projektauftrag verschiedene, bspw. sonderangefertigte Hard- und Software-Systeme (HW/SW), HW/SW-Systemintegrationen, HW/SW-Prototypen, Forschungs- oder Machbarkeitsberichte. In Bezug auf diese Projektergebnisse stellen der *Akzeptanztest* sowie der *Pilottest* relevante Abnahmetestarten dar. Bei *Akzeptanztests* wird die Vollständigkeit der im Pflichtenheft genannten Funktionalitäten, die Belastbarkeit, die Bedienbarkeit und die Ausfallsicherheit durch den AG (Kunden) getestet. Diese Testart ist insbesondere für die Abnahme sonderangefertigter HW/SW-Systeme relevant. Bei DV- und Integrationsprojekten dienen *Pilottests* zum Testen der entwickelten Lösung unter realen Betriebsbedingungen. Bei beiden Testarten hat der AG einen Testplan zu erstellen, welcher die Testfälle und Testbedingungen dokumentiert. Etwaige Fehler werden in einem Abnahmetest-Protokoll dokumentiert.

Der zweite Unter aspekt zeigt die Übergabe der Projektergebnisse. Mittels strukturierter Übergabe- und Übernahmeprotokollen lässt sich dieser Schritt systematisch durchführen und dokumentieren. Der AN spezifiziert im Übergabeprotokoll folgende Inhalte:

- Übergabeobjekte
- Dokumentation
- Leistungsmerkmale
- Übergabemodalitäten

Im Übernahmeprotokoll erfasst der AG:

- Übernahmeobjekte
- durchgeführte Prüfungen
- festgestellte Mängel
- Nachforderungen an den AN
- Abnahmeentscheidung

Der dritte und letzte Aspekt der Abnahme ist die Regelung der technischen Betreuung und künftiger Entwicklungsleistungen. Die Betreuung von Digitalisierungslösungen kann in sog. *Service Level Agreements (SLAs)* spezifiziert werden. In diesen Vereinbarungen wird der Umfang verschiedener Leitungseigenschaften festgelegt. Inhalte von SLA sind in [231] ausgeführt. Dazu zählen *Service-Kennzahlen, Maßnahmen/Sanktionen bei Nichterfüllung, Eskalationsmechanismen, optionale Dienstleistungen, Reporting, Vorgehen bei Änderungen, Kosten, Reviews* und eine *Revisionsliste mit Unterschriften*. Unternehmensintern kann die Übergabe der entwickelten Lösung an ein Servicemanagement der Stammorganisation des AG übergeben werden.

Projektabschlussanalyse

Bei der Projektabschlussanalyse werden im Rahmen einer *Nachkalkulation* die kaufmännischen Ist-Daten den zuvor geschätzten Plandaten gegenübergestellt. Da die Nachkalkulation den jeweiligen Eigeninteressen von AG und AN dient, kann diese auf beiden Seiten zur transparenten Erstellung der Projektbewertung und zur Datenerhebung für die nachgelagerte Erfahrungssicherung erfolgen. Weitere Unteranalysen des Projektabschlusses stellen die Abweichungs- sowie Wirtschaftlichkeitsanalyse dar [232]. Bei einigen Projektergebnissen, bspw. der Einführung eines neuen Informationssystems, kann eine Langzeitbetrachtung für die Bestimmung des effektiv generierten Mehrwerts notwendig sein (vgl. Kapitel 4.5.1).

Erfahrungssicherung

Die Erfahrungssicherung dient der Dokumentation gewonnener Erkenntnisse während der Projektlaufzeit (engl. *Lessons Learned*). Aus Sicht des AG-Unternehmens können hierbei lediglich die Bereiche der eigenen Mitwirkung bewertet werden. Diese werden durch die Projektkonstellation vorgegeben (vgl. Bild 17). Der Erfahrungsgewinn bei Projektkonstellationstyp 3 ist daher naturgemäß deutlich geringer als der, der beiden anderen Projekttypen. Die Erfahrungssicherung hat das Ziel, das Wiederholen bereits gemachter Fehler zu vermeiden und erfolgreiche Praktiken aufrecht

zu erhalten (engl. *Best Practices*). Agile Entwicklungsmethoden, wie bspw. SCRUM, kultivieren die kontinuierliche Erfassung von Projekterfahrungen durch das Durchführen sog. Retrospektiven. Zur Erfahrungssicherung können, die während der Projektlaufzeit gesammelten und bereits dokumentierten Ergebnisse der Retrospektiven konsolidiert werden. Ebenso kann zum Projektabschluss eine dedizierte Projekt-Retrospektive mittels genannter Aspekte durchgeführt und dokumentiert werden. Bei der Dokumentation und Kommunikation von Projekterfahrungen sind die „systemischen Eigenheiten, internen Logiken, Ressourcen und Strukturen“ des jeweiligen Unternehmens zu berücksichtigen [233].

Projektauflösung

Eine definierte Projektauflösung wird in einer gemeinsamen Sitzung aller bestehenden Projektgremien beschlossen. Hierbei werden die erzielten Projektergebnisse mit zusätzlicher optionaler Zusammenfassung der Ergebnisse der vorhergehenden Schritte (Abnahme- und Übergabebericht, Abweichungsanalyse, Kostenkalkulation, Projekterfahrung) kommuniziert. Weiterhin bietet die Sitzung eine Möglichkeit zur Würdigung besonderer Leistungen der Projektmitarbeitenden. Das Ende eines Projektes wird in der Schlusssitzung beschlossen, ggf. noch ausstehende Abschlussaktivitäten in einem *Sitzungsprotokoll* oder einem dedizierten *Projektabschlussbericht* vermerkt.

4.4.4 Zwischenfazit der Implement-Phase

Die Implement-Phase definiert für die effektive und effiziente Umsetzung von Digitalisierungsprojekten drei zentrale Teilprozesse (vgl. Bild 55). Der erste dieser Teilprozesse stellt die projektübergreifende Gesamtsteuerung dar, welche durch gezielte koordinierende Aufgaben die Gesamteffektivität sowie -effizienz steigern kann. Zur systematischen Prüfung potenzieller Chancen sind diese in Kapitel 4.4.1 zusammengetragen.

Der zweite Teilprozess äußert sich in der operativen Projektdurchführung. Hierbei werden als zentrale Einflussgrößen auf die Entwicklungseffizienz die Bildung geeigneter Teamstrukturen, die Auswahl der Entwicklungsmethode sowie die optimale Ausnutzung von Entwicklungswerkzeugen identifiziert und erläutert.

Der dargestellte und ausgeführte Referenzprozess der Phase bietet Vertreter:innen der genannten drei Parteien eine Orientierungshilfe während der Projektlaufzeit und befähigt dabei die Projektleitung zur Optimierung der Projektabläufe und -strukturen.

4.5 Control-Phase

Mit der Control-Phase wird ein Vorgehen beschrieben, welches auf die Erfolgsmessung von Digitalisierungsprojekten abzielt. Die hiermit assoziierten praktischen Problemmerkmale sowie Forschungsdefizite wird mit folgenden Lösungsaspekten begegnet:

- Förderung *neuer Denk- und Verhaltensweisen* auf Basis kollektiver Lernerfahrungen (PM2.2)
- Definition einer einheitlichen *Systematik zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung* von Digitalisierungslösungen (FD1.2)

Der in der Control-Phase beschriebene Prozess zur Ermittlung des Beitrags zur Zielerreichung wird durch übergeordnete Controlling-Prozesse ausgelöst. Als Informationsbasis für weitere Digitalisierungszyklen werden die, im Rahmen der Prozessdurchführung gewonnenen Erkenntnisse, in einem Informationssystem zentral gespeichert (siehe Bild 64).

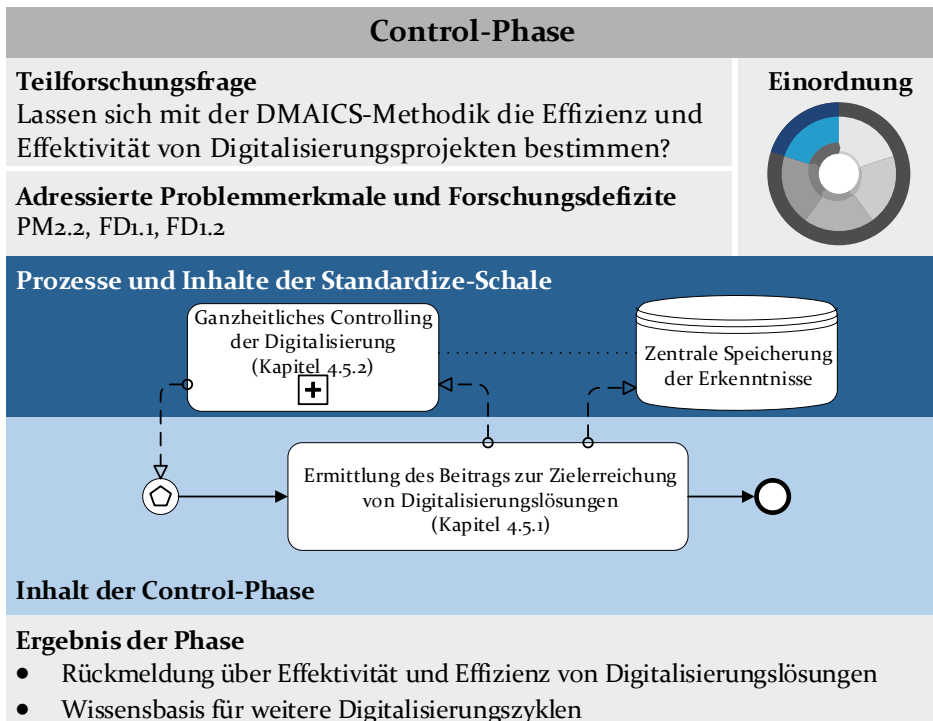


Bild 64: Übersicht und Inhalte der Control-Phase

4.5.1 Ermittlung des Beitrags zur Zielerreichung von Digitalisierungslösungen

Während die Effektivität und Effizienz von Digitalisierungsprojekten im Rahmen der Projektplanung und -steuerung sowie den Nachkalkulationen des Projektabschlusses ermittelt wird, bleiben die Beiträge zur Zielerreichung von Digitalisierungslösungen für das jeweilige produzierende Unternehmen zunächst unbekannt. Deren Erhebung ist jedoch zur Kontrolle der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes digitaler Lösungen und der Ableitung von Optimierungs- und Konsolidierungspotentialen unabdingbar. Die umgesetzten digitalen Lösungen der vorhergehenden Implement-Phase stellen den Betrachtungsgegenstand dar. Diese lassen sich nach Strategieebene und Häufigkeit der Anwendung unterscheiden, Bild 65.

		Strategieebene	
		Operative (Prozessunterstützung)	Strategisch (technischer Befähiger)
Häufigkeit der Anwendung	Keinmal	Ungenutzte operative Lösung (z.B. Fehlentwicklung)	Ungenutzte strategische Lösung (z.B. noch nicht etablierte Serviceplattform)
	Einmal	Einmalig genutzte operative Lösung mit direktem Wertbeitrag (z.B. Ad-hoc-Analysen)	Einmalig genutzte strategische Lösung (z.B. neu eingeführte RPA-Plattform)
	Sporadisch	Sporadisch genutzte operative Lösung mit direktem Wertbeitrag (z.B. Condition-Monitoring-Anwendung)	Sporadisch genutzte strategische Lösung (z.B. Wissensmanagementsystem)
	Regelmäßig	Regelmäßig genutzte operative Lösung mit direktem Wertbeitrag (z.B. Simulationslösung zur Produktionsplanung)	Regelmäßig genutzte strategische Lösung (z.B. BI-Plattform)
	Häufig	Häufig genutzte operative Lösung mit direktem Wertbeitrag (z.B. MES-System)	Häufig genutzte strategische Lösung (z.B. Data-Warehouse)

Bild 65: Systematisierung von Digitalisierungslösungen nach Strategieebene und Häufigkeit der Anwendung

Als operative Digitalisierungslösungen werden Services und Systeme bezeichnet, welche eine direkte Änderung der Geschäftsprozesse hervorrufen und denen sich somit ein direkter, operativer Beitrag zur Zielerreichung zuordnen lässt. Strategische Digitalisierungslösungen stellen technische Befähiger für den Betrieb operativer Lösungen dar. Ihnen kann nur indirekt ein Zielbeitrag durch die Verknüpfung der zugehörigen operativen Digitalisierungslösungen zugemessen werden.

Ermittlung des Wertbeitrags operativer Lösungen

Die Ermittlung des Beitrags zur Zielerreichung von operativen Digitalisierungslösungen dient der Überprüfung der Wirtschaftlichkeit (Effizienz) sowie der Potentialausnutzung (Effektivität). Wie das in Kapitel 4.1.3 vorgestellte Zielmodell der effektiven sowie effizienten Digitalisierung verdeutlicht, gibt eine kombinierte Betrachtung beider Zielgrößen Aufschluss über den Erfolg von Digitalisierungslösungen im unternehmerischen Kontext. Aufbauend auf diesem Verständnis sind zur ganzheitlichen, empirischen Effektivitäts- und Effizienzbewertung von Digitalisierungslösungen die Kausalketten zwischen Aufwand und Nutzen (dem erzielten Ergebnis) und dem ursprünglich geplanten Ziel herzustellen, wie Bild 66 zeigt.

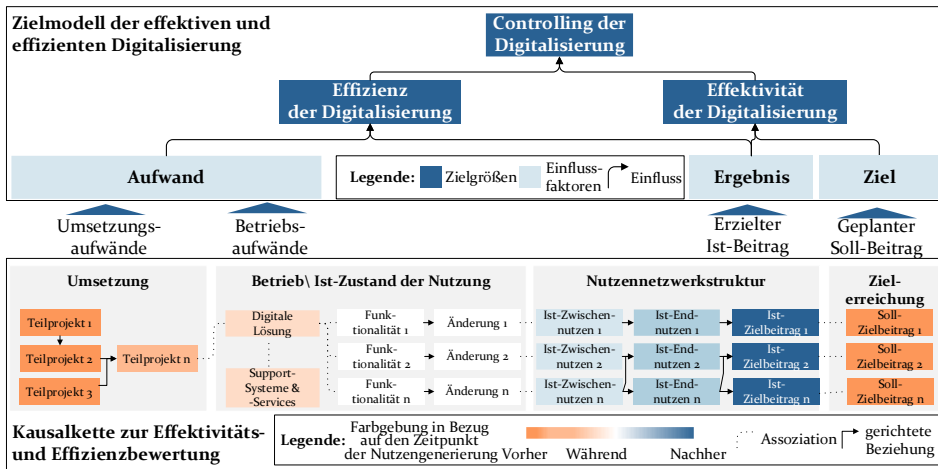


Bild 66: Systematische Aufschlüsselung der Elemente zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung von Digitalisierungslösungen

Der *Aufwand* von Digitalisierungslösungen setzt sich aus den Umsetzungs- und Betriebsaufwänden zusammen. Erstere gehen aus den der jeweils assoziierten (Teil-)Projektaufwänden (Voruntersuchungen, Entwicklung, Integrationsprojekte) hervor, welche im Rahmen des jeweiligen Projektmanagements zu dokumentieren sind (vgl. Kapitel 4.3.2 und 4.4.3). Zu den Betriebsaufwänden zählen fortlaufende Kosten (z.B. Service-, Lizenz-, Schulungs- und Personalkosten). Das der Digitalisierungslösung zuzuschreibende *Ergebnis* resultiert aus deren Anwendung. Hierbei ist die Häufigkeit der Anwendungen der Lösung bzw. ihrer Funktionalitäten zu berücksichtigen, vgl. Bild 65. Die Verwendung der Funktionalitäten der Lösung führt zu Änderungen der Geschäftsprozesse. Mit diesen Änderungen gehen Wertbeiträge verschiedener Nutzenarten (monetärer und nicht monetärer Art) einher (vgl. Ermittlung der Nutzennetzwerkstruktur in

Kapitel 4.2.2). Durch die Zuordnung der Endnutzen auf die Unternehmensziele wird die Strategiekonformität der Wertbeiträge gewährleistet. Aus der Gegenüberstellung des Ist-Beitrags mit den Aufwänden folgt die Wirtschaftlichkeit (Effizienz) der Digitalisierungslösung. Zur Effektivitätsbestimmung werden die Ist-Zielbeiträge den ursprünglich geplanten Soll-Zielbeiträgen (vgl. Kapitel 4.2.2) gegenübergestellt. Etwaige Abweichungen (ein Über- bzw. Untertreffen) der geplanten und erreichten Zielbeiträge können ein oder mehrere Ursachen zugrunde liegen, welche auf Fehleinschätzungen bzgl. des Anlasses, des Werts und der Lösung zurückzuführen sind (vgl. Wirkzusammenhänge in Bild 37):

- Fehleinschätzung bzgl. des Anlasses: Der Einsatzzweck der Lösung weicht vom geplanten Anlass ab.
- Fehleinschätzung bzgl. des Werts: Der kumulierte Wert der Lösung übertrifft oder unterliegt dem initial angenommenen Wert.
- Fehleinschätzung bzgl. der Lösung: Der Funktionalitätsumfang der Lösung erfüllt nicht den geplanten Umfang. Die Umsetzungs- und Betriebsaufwände entsprechen nicht den geplanten Aufwänden.

Diese Fehleinschätzungen resultieren aus eingegangenen Risiken, welche bei der Planung in komplexen Systemen mit einem emergenten Charakter nicht gänzlich zu vermeiden und somit als natürliches Phänomen zu erachten sind. Im Rahmen der Methodik dieser Arbeit wird die Entscheidungsqualität durch den konsequenten Einbezug mehrerer Wissens- und Verantwortungstragenden und dem systematischen Herbeiführen objektiver Entscheidungsprozesse erhöht. Die Dokumentation aller Entscheidungsprozesse von der Ideenfindung bis zum Einsatz der Digitalisierungslösung, ermöglicht einen retrospektiven Abgleich und fördert somit maßgeblich die kollektive Lernerfahrung des jeweiligen Unternehmens.

Ermittlung der Relevanz strategischer Digitalisierungslösungen

Die Umsetzungs- und Betriebsaufwände strategischer Lösungen sind analog zu den operativen zu ermitteln. Jedoch lässt sich der Wertbeitrag strategischer Digitalisierungslösungen nur indirekt bestimmen. Hierzu ist die Kenntnis aller bestehenden und perspektivischen operativen Lösungen notwendig. Die Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Relevanz und Rentabilität strategischer Lösungen führt zu einer komplexen und aufwändigen Nutzenbestimmung, die einer effizienten Abwägung entgegensteht. Alternativen zu einem rein empirischen Vorgehen bilden Experteneinschätzungen sowie die Auswertung von Nutzungsdaten, wie sie etwa bei Plattformlösungen üblich sind.

4.5.2 Informationssystem zur ganzheitlichen Erfassung der Kausalketten der Digitalisierung

Um einen Erkenntnisgewinn aus vergangenen Digitalisierungsaktivitäten zu erlangen, ist eine Erfassung und retrospektive Betrachtung der zugrundeliegenden Kausalketten notwendig. Die nachfolgenden Artefakte stellen relevante Informationselemente von diesen dar:

- Verantwortlichkeiten
- zentrale Beiträge, z.B.: Ideen, strategische Initiierung, operative Umsetzung, Entwicklung, Betrieb, Anwendung
- Entscheidungen und zugehörige Entscheidungsgrundlagen
- definierte und erreichte Ziele
- freigegebene Ressourcen
- Ziel- oder Ressourcenänderungen
- weitere Artefakte, z.B. entstandenes geistiges Eigentum

Die Kausalketten der Digitalisierung, die sich von der Idee bis hin zur umgesetzten Lösung ergeben, sind meist lang. Dies ist insbesondere auf die anfänglichen Ungewissheiten über den Zielzustand, die dynamischen Veränderungen des Unternehmensumfelds und die oftmals hohe soziale Komplexität (Anzahl und Wechsel involvierter Akteur:innen) zurückzuführen. Um die Kausalketten der Digitalisierung für eine retrospektive Betrachtung effizient aufzuzeigen, wird eine stete Dokumentation der oben genannten Elemente als notwendig erachtet. Als eine mögliche Lösung wird in Bild 67 das für diesen Zweck entwickelte Informationssystem „Go Digital“ vorgestellt, in welches die gesamte Methodik dieser Arbeit implementiert wurde, und das eine einheitliche Erfassung der Kausalketten der Digitalisierung sicherstellt. Somit wird die Grundlage für einen kollektiven Erkenntnisgewinn gebildet.

„Go-Digital“ ist eine webbasierte Anwendung, welche allen Mitarbeitenden eines Unternehmens eine direkte Partizipation an und eine ganzheitliche retrospektive Betrachtung von Digitalisierungsaktivitäten ermöglicht. Um ein gemeinschaftliches Denkmuster hinsichtlich der Digitalisierungszyklen zu etablieren, wird das in Kapitel 3 vorgestellte Vorgehensmodell als globale Navigationsmöglichkeit und Orientierungshilfe auf der Startseite positioniert. Zu den einzelnen Phasen des Modells werden die entsprechenden Prozessmodelle auf Detailseiten erläutert und darin die zugehörigen Eingabeansichten verknüpft. Dies erlaubt zudem eine Exploration des vor- sowie nachgelagerten Prozesskontextes. Die über die Eingabeansichten erfassten Informationselemente sind Bestandteil eines durchgängigen

Datenmodells, welches Metadaten und Inhalte von Ideen, Reviews, Nutzenschätzungen, Lösungskonzepte, Projektaufträge, eingeführte Digitalisierungslösungen und erzielte Nutzwerte semantisch verknüpft. Die erfassten Informationselemente werden je Phase in einer Dashboard-Ansicht organisiert.

„Go-Digital“ implementiert die in dieser Arbeit vorgestellte DMAICS-Methodik, indem die folgenden Bestandteile je Phase wie folgt umgesetzt werden:

- **Auslöser:** Autorisierung definierter Rollenprofile für die Betätigung von Auslösern und Benachrichtigungen über ausgelöste Prozesse und deren Übersicht in Dashboard-Ansichten
- **Aufgaben:** Strukturierung und logische Verknüpfung aller Aufgaben durch Integration der in dieser Arbeit entwickelten Prozessmodelle und deren inhaltliche Beschreibung
- **Ein- und Ausgaben:** Erfassung der Ein- bzw. Ausgaben aller Prozessschritte in Form von Informationselementen, welche über ein Datenmodell miteinander verknüpft sind
- **Ausführende:** Informationen über aktuelle und vergangene Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten über Aktivitäten des Digitalisierungsprozesses

Hinweise: Die Implementierung des Softwareprototypen erfolgte in der Programmiersprache Python unter Verwendung des Web-Frameworks Django. Das Framework zeichnet sich insbesondere durch ein integriertes User- und Rollen-Management, inkl. Backend-Funktionalitäten, einen Object Relational Mapper (ORM) zur entwicklungsfreundlichen Umsetzung des Datenmodells, der teilautomatisierten Erstellung von Webformularen und der Möglichkeit zur Entwicklung von REST-Schnittstellen (Representational State Transfer) zur Koppelung mit weiteren Informationssystemen, wie etwa Workflow-Management- oder Projekt-Management-Systemen, aus. Weiterhin folgt das Framework einer Model-Template-View-Architektur (MTV) und bestärkt inhärent eine hohe Modularität und Erweiterbarkeit der Gesamtanwendung durch die interne Organisation von Teilprogrammen in sog. Apps.

4 Detaillierung der DMAICS-Methodik

a) Vorgehensmodellansicht

The DMAICS process model is shown as a circular diagram with five main phases: Define, Measure, Analyze, Implement, and Control. Each phase has associated sub-phases and activities. The 'Define' phase is highlighted with a green circle, indicating its focus in the subsequent views.

b) Prozessmodellansicht

Prozessmodell der Define-Phase

```

    graph LR
      A[Aufgaben des Ideenmanagements] --> B[Ermittlung von Ideen und Bedarfen]
      B --> C[Review von Digitalisierungs-Ideen]
      C --> A
  
```

Erläuterung der Teilprozesse

Aufgaben des Ideenmanagements

Ermittlung von Digitalisierungs-Ideen und Bedarfen

Übersicht von Methoden:

Methoden-Typ	Methoden-Typ	Methoden-Typ
Big-Data, KI	Multi-Stakeholder	Business-Case
...

Aufgabe

Durchführung von Methoden zur Ideengenerierung
Standardisierte Erfassung von Ideen

Aktion

Start

c) Dashboard-Ansicht

Themen gesamt: 18 (Alle anzeigen)

Geprüfte Themen: 14 (Alle anzeigen)

Ausstehende Themen: 4 (Starte Review)

Letzten 5 Ideengeber

Autor*in	Themen-ID	Profil
Max Mustermann	18	Anzeigen
Max Musterfrau	17	Anzeigen
Juan Pérez	16	Anzeigen
John Smith	15	Anzeigen
Jane Doe	14	Anzeigen

Neuesten 5 Ideen

ID	Titel	Datum	Review-Status	Reviewer-Liste
18	Retrofitting Fuelstand	15.01.2022	Ausstehend	anzeigen Update
17	Anomaly Detector	13.01.2022	Ausstehend	anzeigen Update
16	KI-basierte Prozesszeitreduktion	09.01.2022	Ausstehend	anzeigen Update
15	Digitales Shopfloorboard	08.12.2021	Ausstehend	anzeigen Update
14	Anlagenmonitoring	04.12.2021	Geprüft	anzeigen Update

d) Eingabeansicht

Ideen-Steckbrief

Metadaten: Details, Kategorien, Produkt, Prozess, Ressourcen

Aufnahmen: Verweise, Notizen, Hierarchieebene, Updateverhalten, Element, Menge, Funktion

Multimédia: Bild-Assessment, Link zur Dokumentenfür, Beschreibung: ID des Betroffenen Objekts, Funktionsbereiche

Ideen-Info: Bewertung, Erhebungsdatei, Status

Adressen: Aufgaben, unklarer Problembeschreibung, An der Identifizierung beteiligt, Anknüpfung, Quantität, Link zur Dokumentenfür

Wert: Ziel-Beschreibung, Beschreibung, SWAG, Kriterien, Spezifisch, Abstrakt, Funktionell, Quantitativ, Link zur Dokumentenfür

Lösung: Beschreibung des Lösungsvorschlags, Technischer/strategischer Ansatz, Link & Methode zur Erhebungsanfrage, Link zur Dokumentenfür

Bild 67: Bildschirmaufnahmen des webbasiertes Informationssystems „GoDigital“; Darstellung verschiedener Ansichten am Beispiel der Define-Phase: a) Vorgehensmodellansicht, b) Prozessmodellansicht, c) Dashboard-Ansicht, d) Eingabeansicht

4.5.3 Zwischenfazit zur Control-Phase

Die Control-Phase zeigt auf, wie operative und strategische Digitalisierungslösungen Beiträge zur Zielerreichung des Unternehmens leisten. In diesem Zuge werden zudem auftretende Dissonanzen, welche sich durch ein Delta zwischen Soll- und Ist-Zuständen äußern, aufgelöst. Dies erfolgt durch die retrospektive Betrachtung der Kausalketten der Digitalisierung.

Zur Erfassung dieser Kausalketten wird eine softwaretechnische Implementierung der Methodik in Form eines Informationssystems vorgestellt. Durch die Etablierung eines Referenzprozesses wird eine zusätzliche Orientierungshilfe für den Digitalisierungsprozess geschaffen. Dadurch soll die Durchführungs- und Entscheidungsqualität von bzw. in Teilprozessen verbessert werden.

Zum einen werden auf Basis des dargelegten Vorgehens Optimierungs- und Konsolidierungspotentiale identifiziert, welche als Ideen in den nächsten Digitalisierungszyklus einfließen können. Zum anderen entsteht durch die Reflexion vergangener Digitalisierungsaktivitäten eine kollektive Lernerfahrung zugunsten einer sich fortlaufend optimierenden Digitalisierung

5 Validierung

Die Validierung der DMAICS-Methodik erfolgt mittels Fallstudien verschiedener Digitalisierungsvorhaben im Produktionskontext, welche im Technologiezentrum für Hochleistungs- und Vakuumkomponenten der Siemens Healthcare GmbH durchgeführt wurden. Im Rahmen der Validierung wird der Grad der Abdeckung der in Kapitel 2.3.4 aufgezeigten Handlungsbedarfe (inhaltliche Anforderungen) sowie der in Kapitel 3.2 definierten vier formalen Anforderungen *Validität*, *Objektivität*, *Utilität* und *Reliabilität* unter Hinzunahme von Expertenmeinungen qualitativ bewertet. Die Bewertung nach den ersten drei Gütekriterien wird je Fallstudie in den Unterkapiteln 5.1-5.6. Da ein Re- oder Paralleltest einzelner Fallstudien nicht möglich ist, wird die *Reliabilität* in der Gesamtschau aller Fallstudien in einem abschließenden Fazit zur Validierung in Kapitel 5.7 bewertet. Zur möglichst umfassenden Evaluierung der Methodik werden je zwei Validierungsszenarien der drei Basistechnologien *Internet of Things (IoT)*, *Data Analytics* sowie *Cloud Computing* betrachtet (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Übersicht der Validierungsszenarien der DMAICS-Methodik

Basis- technologie	Validierungsszenario
IoT	Retrofitting von Bestandsanlagen zur Befähigung prozessbegleitender Qualitätskontrollen
	Anlagenexterne IoT-Sensorik zur flexiblen Schwingungsanalyse von Produkten während Fertigungs- und Prüfprozessen
Data Analytics	Asynchroner Einsatz einer KI-Lösung zur Bildsegmentierung zur Extraktion von Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit von Bauteilen
	Prozessbegleitender Einsatz eines KI-Modells zur datenbasierten Testzeitreduktion eines Komponententests
Cloud Computing	Plattformbasierter Betrieb von Machine Learning-Anwendungen
	Digitales Echtzeitabbild von Produktionsanlagen zur Fertigungsüberwachung

5.1 Szenario 1: Retrofitting von Bestandsanlagen

Im Rahmen eines Industrie 4.0-Assessments wurden verschiedene strategische Handlungsfelder identifiziert. Eines davon befasst sich mit dem Retrofitting von Bestandsanlagen mittels der Integration zusätzlicher Sensoren, um ergänzende prozessbegleitende Qualitätskontrollen zu ermöglichen. Im Rahmen eines Reviewprozesses mit Vertreter:innen aus dem Funktionsbereich des Prozessengineerings wurden potentielle Anwendungsfälle eruiert. Im Zuge eines Priorisierungsverfahrens wurde ein Pilotprojekt selektiert, welches einen Qualitätsparameter von besonders hohem Interesse sowie hohem Potential in Hinblick auf die Übertragbarkeit aufwies. Die Messaufgabe stellte die Bestimmung der Ölqualität eines Füllprozesses dar. Das Projekt wurde nach Spezifikation der Messparameter und des Messprinzips, Messfähigkeitsnachweis, Konzeption des Gesamtsystems, Umsetzung und Inbetriebnahme strukturiert. Die ersten beiden Teilprojekte sind als Machbarkeitsstudien einzustufen, da Expertenaussagen zufolge die Machbarkeit einer aussagekräftigen Inline-Messung nach als unsicher galt. Im Rahmen der Machbarkeitsstudien wurde der Partikelgehalt als geeigneter Parameter bestimmt sowie die Messfähigkeit des ausgewählten Sensorsystems mittels Labor-Referenzmessungen nachgewiesen. Das im Rahmen des Umsetzungsprojektes entwickelte Lösungskonzept wurde unter interdisziplinärer Zusammenarbeit verschiedener Fachabteilungen erstellt und das Zusammenspiel von OT- sowie IT-Komponente harmonisiert (siehe Bild 68).

Die Hardware des nachgerüsteten Sensorsystems setzt sich aus einem HMI, einem Barcodescanner, einem Industrie-PC (IPC) sowie einem Partikelsensor zusammen. Das HMI zeigt dem Operator aktuelle Messwerte sowie den Status des Messsystems an. Der Barcode-Scanner dient der späteren Bauteilzuordnung der Messwerte. Eine Verbindung des IPCs mit der bestehenden Anlagensteuerung ermöglicht die Messdurchführung zu definierten Prozesszeitpunkten. Über eine REST-Schnittstelle werden die Messdaten an eine Datenplattform zur Persistierung geschickt. Von dieser können die Daten für Analysen gelesen sowie für ein Remote-Prozessmonitoring mittels BI-Softwarewerkzeugen in Dashboards visualisiert werden.

Tabelle 13: Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 1

Inhaltliche Anforderung	Bewertung	Begründung	Referenz	
PM1.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Systematischer Umgang mit Risiken im Rahmen der Projektstrukturplanung 	Kapitel 4.3.1	
PM1.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Systematischer Umgang mit Unsicherheiten zur Projektlaufzeit durch den Einsatz agiler Arbeitsmethoden 	Kapitel 4.4.2	
PM2.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Prävention von Interessenskonflikten aufgrund Schaffung von Transparenz im Review-Prozess sowie systematischer Priorisierung 	Kapitel 4.1.1	
PM3.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Synchronisation von Zeitplänen und Meilensteinen im Rahmen des Multiprojektmanagements 	Kapitel 4.4.1	
PM3.3	●	<ul style="list-style-type: none"> Agile Zusammenarbeit zwischen Teams koordiniert über das Multiprojektmanagement 	Kapitel 4.4.1	
FD1.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserte Orientierungsfähigkeit und Steigerung der Kommunikationseffizienz durch Verwendung einer gemeinsamen Sprache aller beteiligten Mitarbeitenden im Digitalisierungsprozess 	Alle Kapitel	
FD1.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Bedarfsgerechte Variation von Entwicklungsmethoden sowie der Projektteamkonstellationen 	Kapitel 4.4.2	
FD2.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Effizientes Outsourcing von Teilentwicklungsprojekten an spezialisierte IT- und OT-Fachabteilungen mittels Systemspezifikationen 	Kapitel 4.3.3	
FD2.3	●	<ul style="list-style-type: none"> Einbezug verschiedener Fachdomänen bei der Konzeption zur Sicherstellung der Strategiekonformität 	Kapitel 4.3.1	
○ nicht abgedeckt	◐ teilweise abgedeckt	◑ grundlegend abgedeckt	● ausführlich abgedeckt	● umfassend abgedeckt

5.2 Szenario 2: Anlagenexterne IoT-Sensorik

Das aktuelle Szenario resultiert auf der Idee eines Mitarbeitenden das Schwingungsverhalten von Drehanodenröntgenstrahlern bedarfsgetrieben überwachen zu können, um somit gezielt Wissensgewinne über das Bauteilverhalten während verschiedener Fertigungsprozesse zu erlangen. Im Rahmen des Ideenerfassungs- und Reviewprozesses äußerten Vertreter:innen verschiedener Funktionsbereiche ihr Interesse an einer solchen Lösung. Weiterhin konnten Ergebnisse von themenverwandten Voruntersuchungen für die Generierung eines Grobkonzeptes verwendet werden, was ein anlagenexternes Sensorsystem vorgibt. Die zur Laufzeit eines Digitalisierungsprogrammes erfasste Idee wurde dynamisch im Rahmen der strategischen Umsetzungsplanung in die Digitalisierungs-Roadmap integriert

und an ein unternehmensinternes Projektteam zur Detaillierung der Konzeption und Umsetzung delegiert. Das Gesamtvorhaben wurde in die vier Teilprojekte Entwicklung eines Prototyps, Erbringung des Messfähigkeitsnachweises, Vervielfältigung des Systems und Messreihendurchführung strukturiert. Das umgesetzte Lösungskonzept ist in Bild 69 illustriert.

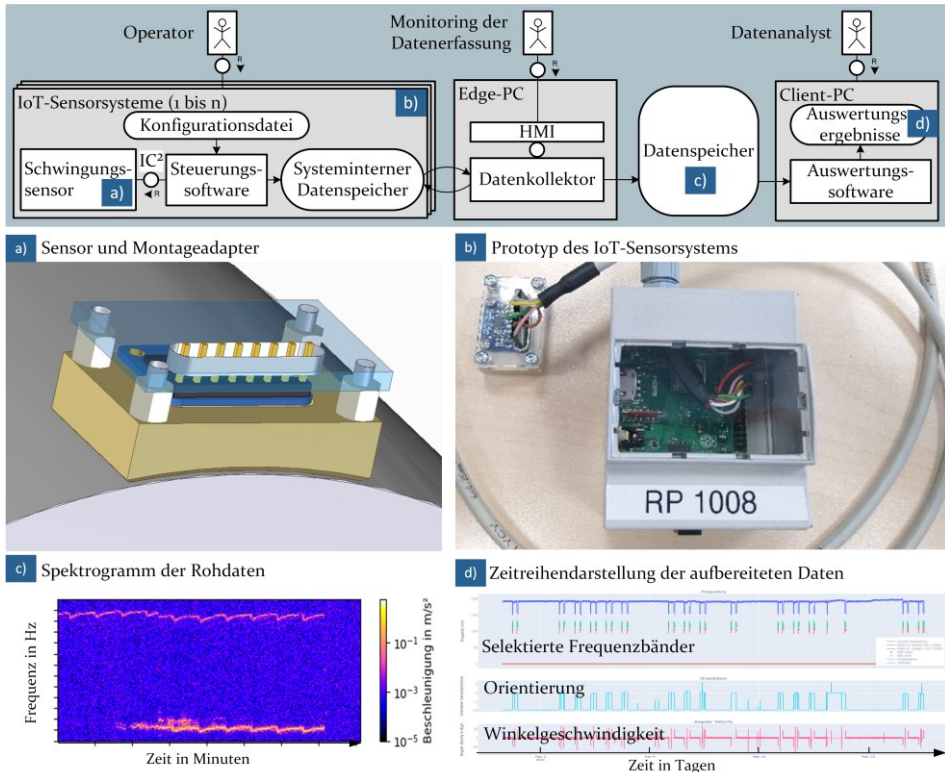


Bild 69: Umgesetztes Konzept einer anlagenexternen IoT-Sensorik zur fertigungsbegleitenden Schwingungsanalyse

Das Konzept basiert auf einem im Forschungsprojekt CoMoRes [234] entwickelten Sensorsystem, welches für den vorliegenden Anwendungsfall angepasst wurde [S3, 234]. Die Messfähigkeit des Systems wurde nach dem Verfahren 1 der Messsystemanalyse für geeignet befunden [S4]. Für die Durchführung umfangreicher Messreihen wurde das System auf eine Anzahl von 30 Systemen skaliert. Um einen ersten effektiven Mehrwert mittels der Systeme zu erzielen, wurden in einem Zeitraum von mehreren Monaten Messreihen durchgeführt. In diesem Zuge konnte das entwickelte System an die Stammorganisation übergeben werden.

Tabelle 14: Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 2

Inhaltliche Anforderung	Bewertung	Begründung	Referenz
PM1.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Anwendung agiler Entwicklungsmethoden mit inkrementeller Erweiterung des Zielsystems in enger Abstimmung mit Kunden verschiedener Funktionsbereiche (Produktion, Entwicklung) 	Kapitel 4.4.2
PM2.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Umsetzung schlanker Prozesse für die kontinuierliche Integration neuer Systemversionen im Rahmen regulatorischer Vorgaben Steigerung der Effektivität des Vorhabens durch kontinuierlichen Wissens- und Erfahrungsaustausch bis hin zur Ergebnisdokumentation 	Kapitel 4.4.2, Kapitel 4.3.3
PM3.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Nutzung des verteilten Wissens im Unternehmen durch systematischen Einbezug der Engineering-Community bei der Ideengenerierung 	Kapitel 4.1.2
FD1.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Identifikation weiterer Anspruchsgruppen durch systematischen Einbezug der Engineering-Community bei der Ideengenerierung Integration dynamischer Bedarfe aus dem Produktionsumfeld in die strategische Umsetzungsplanung 	Kapitel 4.1.2, Kapitel 4.2.1
FD1.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Systematische Kombination agiler Entwicklungsprozesse mit linearen Prozessen bei der Durchführung von Messreihen 	Kapitel 4.4.2
FD 2.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Systematischer Einbezug strategischer Aspekte (Wiederverwendbarkeit, Flexibilität der Lösung) bei der Nutzenprognose 	Kapitel 4.4.2
FD2.3	●	<ul style="list-style-type: none"> Interdisziplinäre Entwicklung des Lösungskonzeptes auf Basis des 4+1-Sichtenmodells unter Berücksichtigung abteilungsspezifischer Strategiemuster 	Kapitel 4.3.1

○ nicht abgedeckt ◐ teilweise abgedeckt ◑ grundlegend abgedeckt ◒ ausführlich abgedeckt ● umfassend abgedeckt

5.3 Szenario 3: Asynchroner Einsatz einer KI-Lösung

Für Ansätze der prozessübergreifenden Nutzung von Produktionsdaten stellt die Extraktion der Kerninformation aus komplexen Datenbeständen eine wichtige Grundlage dar [S5–S7]. Dem strategischen Paradigma der prozessübergreifenden Datennutzung folgend, entstand die Idee, Merkmale von Bauteilen aus vorhandenem Bildmaterial auf generische Weise mittels Machine Learning-Verfahren zu gewinnen. Um die Machbarkeit einer solchen Entwicklung zu prüfen, wurde ein Projekt mit dem Ziel eines Proof-of-Concepts (PoC) gestartet, welches einen Wissens- und Erfah-

rungsgewinn bzgl. des praktischen Einsatzes von Machine Learning-Algorithmen im Fertigungsumfeld erreichen soll. Das umgesetzte Konzept ist in Bild 70 veranschaulicht.

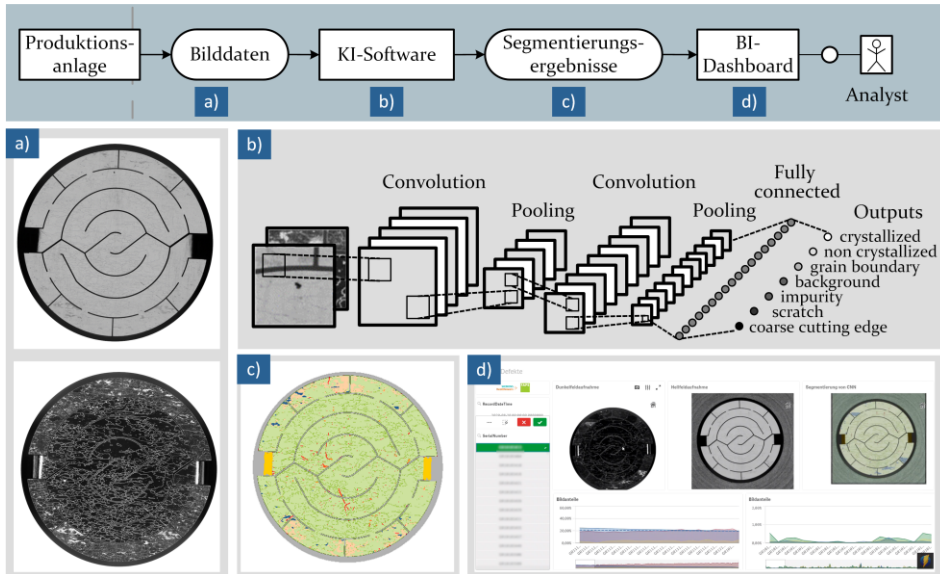


Bild 70: Lösungskonzept für den exemplarischen Ex-situ-Einsatz von KI-Modellen, i.A.a. [P4]

Das Konzept sieht vor, Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit von Wolfram-Flachemittern auf Basis von Mikroskopaufnahmen, welche im Rahmen eines Prüfprozesses aufgenommen werden, zu segmentieren. Der Kernbestandteil des entwickelten Segmentieralgorithmus stellt ein Convolutional Neural Network dar, welches jedem Pixel des Eingangsbildes eine der Output-Klassen zuweist [P4]. Aus den Segmentierungsergebnissen werden Kennwerte berechnet, die in einem interaktiven Dashboard zur Analyse bereitgestellt und in einem Datenbanksystem für nachgelagerte prozessübergreifende Analysen gespeichert werden. Der im Unternehmen stattfindende Wissensaufbau äußerte sich unter anderem dadurch, dass der entwickelte und applizierte Digitalisierungsansatz als zentraler Bestandteil in ein KI-basiertes Assistenzsystem für einen visuellen Prüfprozess von Röntgenrastern übertragen wurde [S8][P5].

Tabelle 15: Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 3

Inhaltliche Anforderung	Bewertung	Begründung	Referenz
PM1.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Risikominimierung durch Reduktion des Projektumfangs im Rahmen der Projektstrukturplanung sowie Fokussierung des Projektinhalts auf nicht-monetäre Zielgrößen des Wissenszugewinns 	Kapitel 4.2.2, Kapitel 4.3.2
PM1.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Kapselung technischer Komplexität in einem spezialisierten Expertenteam 	Kapitel 4.4.2
PM2.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Effektiver Erfahrungsaufbau im Hinblick auf den Einsatz neuer Technologie im Rahmen von Kollaborationsprojekten 	Kapitel 4.3.3
PM3.3	●	<ul style="list-style-type: none"> Risikovermeidung durch asynchrone Entwicklung und Einsatz neuer Lösungen ohne direkte Wechselwirkung zum Produktionsbetrieb 	Kapitel 4.3.1
FD1.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Befähigung effizienter Kommunikation durch Verwendung einer einheitlichen Sprache und Förderung der Orientierung mittels transparenter Einordnung des Vorhabens in den Gesamtkontext 	Alle Kapitel
FD2.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Berücksichtigung strategischer Aspekte (Beitrag zur strategischen Zielsetzung einer prozessübergreifenden Datennutzung) bei der Nutzenprognose 	Kapitel 4.2.2

○ nicht abgedeckt ◐ teilweise abgedeckt ● grundlegend abgedeckt ● ausführlich abgedeckt ● umfassend abgedeckt

5.4 Szenario 4: Prozessbegleitender Einsatz eines KI-Modells

Validierungsszenario 4 basiert auf der Idee anhand verfügbarer Prozessdaten die Testdauer eines Komponententests zu reduzieren. Aufgrund des hohen monetären Einsparungspotentials der Idee wurde ein Digitalisierungsprojekt aufgesetzt, dessen Projektstruktur eine Machbarkeitsstudie, ein Umsetzungsprojekt und ein Integrationsprojekt umfasst. Die realisierte Systemarchitektur ist in Bild 71 dargestellt.

Die Systemarchitektur zeigt den Einsatz einer Softwarelösung, welche Messdaten einer Testanlage zur Prozesslaufzeit dazu verwendet, die Testzeit geprüfter Bauteile zu senken. Hierbei determiniert ein KI-Algorithmus prozessbegleitend auf Basis der anfallenden Prozessdaten das Testergebnis. Das ermittelte Testergebnis wird im Device History Record (DHR) der geprüften Komponente im Manufacturing Execution System gespeichert und über ein Dashboard an den Fertigungsmitarbeitenden übermittelt.

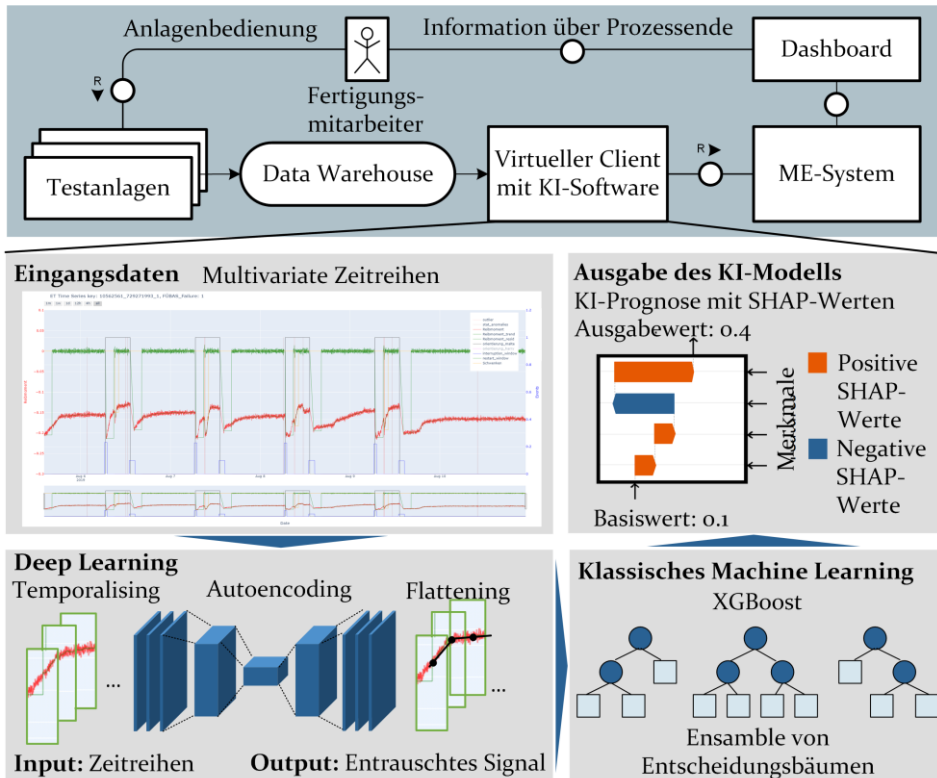


Bild 71: Systemarchitektur des prozessbegleitenden Einsatzes einer KI-Lösung zur Testzeitreduktion sowie graphische Darstellung des umgesetzten Algorithmus

Der implementierte KI-Algorithmus verwendet multivariate Zeitreihendaten als Eingabe. Er weist einen hybriden Ansatz aus der Kombination eines Deep-Learning- und eines klassischen Machine Learning-Algorithmus auf. Den Deep-Learning-Teil stellt ein Autoencoder-Netzwerk dar, welches die Eingangsdaten in enträuschte Signale umwandelt. Anschließend trifft ein XGBoost-Algorithmus einen Prognosewert. Zudem wird die Erklärbarkeit des Prognosewerts durch die Berechnung von Shapley Additive Explanations (SHAP)-Werten gewährleistet, welche den Einfluss einzelner Features auf das Prognoseergebnis angeben. Für Komponenten, deren Prognosewert über einem gewissen Schwellwert liegt, kann der Test bereits nach durchschnittlich ca. 20% der ursprünglichen Testzeit mit einer „Gut“-Entscheidung beendet werden. Dies trifft für etwa 60% der Komponenten zu. Für die übrigen Komponenten wird der Testprozess fortgesetzt. Die Bewertungen des Abdeckungsgrads der Methodik bzgl. der zutreffenden inhaltlichen Anforderungen sind in Tabelle 16 aufgelistet.

Tabelle 16: Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 4

Inhaltliche Anforderung	Bewertung	Begründung	Referenz
PM1.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Systematischer Umgang mit Unsicherheiten mittels einer Projektstrukturplanung 	Kapitel 4.3.2
PM1.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Effiziente Entwicklung von Teilprojekten durch die Bildung geeigneter Projekttopologien sowie den adäquaten Einsatz von Werkzeugen 	Kapitel 4.4.2
PM2.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Auswahl der Idee zur aktiven Weiterverfolgung auf Basis der Ideenpriorisierung sowie Initialisierung des Projektauftrages im Rahmen der strategischen Umsetzungsplanung Systematischer Einbezug von Stakeholdergruppen in Abhängigkeit von der Vorgehensphase (Ideenreview, Konzeptionierung, Umsetzungs- und Integrationsprojekt) 	Kapitel 4.1.2, Kapitel 4.1.3, Kapitel 4.3.2, Kapitel 4.3.3
PM2.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Erfahrungsgewinn beteiligter Unternehmensfunktionen durch die Bewältigung der Aufgabe des erstmaligen betriebsbegleitenden Einsatzes einer Machine Learning Lösung in dem Produktionsbereich, insbesondere im Bereich der interdisziplinären Konzeptionierung, der ganzheitlichen Planung sowie der agilen Durchführung. Kapselung der Kernherausforderung in unternehmensinternen Expertenteams 	Kapitel 4.3.1, Kapitel 4.3.2, Kapitel 4.4.2
PM3.3	●	<ul style="list-style-type: none"> modulare Kapselung von volatilen Technologien sowie Entwicklung von Fallbackstrategien bei der Lösungskonzeption 	Kapitel 4.3.1
FD 1.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Beitrag zur Verbesserung der Orientierungsfähigkeit vorhabensbeteiligter Stakeholder durch Verwendung einer gemeinsamen Sprache im durchgängigen Prozessmodell 	alle Kapitel
FD 2.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Effizientere Zusammenarbeit durch klare Zuständigkeiten und Schnittstellen bei Projektvorbereitung, -durchführung und -abschluss 	Kapitel 4.3.3, Kapitel 4.4.2, Kapitel 4.4.3
FD 2.3	●	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhte Akzeptanz der Lösung durch vorgegebene interdisziplinäre Entscheidungsprozesse bei gleichzeitiger Berücksichtigung domänenspezifischer Strategiemuster Erhöhte Effizienz bei der interdisziplinären Zusammenarbeit durch eine situationsbedingte, systematische Kombination sequenzieller und agiler Arbeitsmethoden 	Kapitel 4.3.1, Kapitel 4.4.2

○ nicht abgedeckt ◐ teilweise abgedeckt ● grundlegend abgedeckt ● ausführlich abgedeckt ● umfassend abgedeckt

5.5 Szenario 5: Plattformbasierte Entwicklung

Der Einsatz von KI-Lösungen im Produktionsbereich geht mit neuen Herausforderungen einher:

- Verwaltung neuer digitaler Objekte in Form von Trainingsdaten, Modellen und Anwendungscode
- Notwendigkeit des Monitorings der eingesetzten KI-Modelle bzgl. der Korrektheit der Vorhersagen
- Forderung nach schnellen Änderungszyklen, z.B. im Falle der Notwendigkeit eines Re-Trainings der Modelle aufgrund veränderter Eingangsdaten

Den Benchmark für den Umgang mit diesen Herausforderungen stellen dedizierte Cloud- sowie On-Premises-Plattformen dar, welche in ihrem Funktionsumfang die Entwicklung sowie den Betrieb von KI-basierten Lösungen nach MLOPS-Praktiken (vgl. Kapitel 2.1.2) unterstützen. Aus dem strategischen Bedarf, den Einsatz von KI-Lösungen zu professionalisieren, wurde ein Pilotprojekt initialisiert, welches einen abteilungsübergreifenden Erfahrungsaufbau in Bezug auf diese neuen Technologien bewirkt. Das im Rahmen dieses Projektes umgesetzte Konzept ist in Bild 72 dargestellt.

Der dem Szenario zugrundeliegende Anwendungsfall zeigt ein Edge-Gerät, welches über das IoT-Protokoll MQTT an ein Cloudgateway angebunden ist. Dieses beinhaltet Broker-Funktionalitäten und verfügt somit über die Funktionalität des Datenroutings. Die Daten des Edge-Geräts werden in einen skalierbaren Cloud-Speicher geleitet und dort persistiert. Das im Rahmen des Pilotprojektes implementierte ML-Modell dient der unüberwachten Anomaliedetektion in Schwingungsdaten. Bei dessen Entwicklung wurden AzureML-Instanzen verwendet, welche eine Auswahl an Rechenleistungsoptionen und spezialisierte Funktionalitäten für die kollaborative Entwicklung von ML-Modellen aufweisen. Bspw. lassen sich ML-Experimente auf transparente Weise dokumentieren und reproduzieren sowie Versionen von trainierten Modellen verwalten. Weiterhin lassen sich plattforminterne, automatisierte Pipelines von der Paketierung, über die Freigabe von Modellen, bis hin zur Bereitstellung der ML-Modelle als Webservice erzeugen. Ebenfalls decken in der Plattform beheimatete Projektmanagement- und Code-Verwaltungswerkzeuge sowie Dienste zur Autorisierung und Authentifizierung weitere im Unternehmenskontext notwendige Funktionalitäten ab.

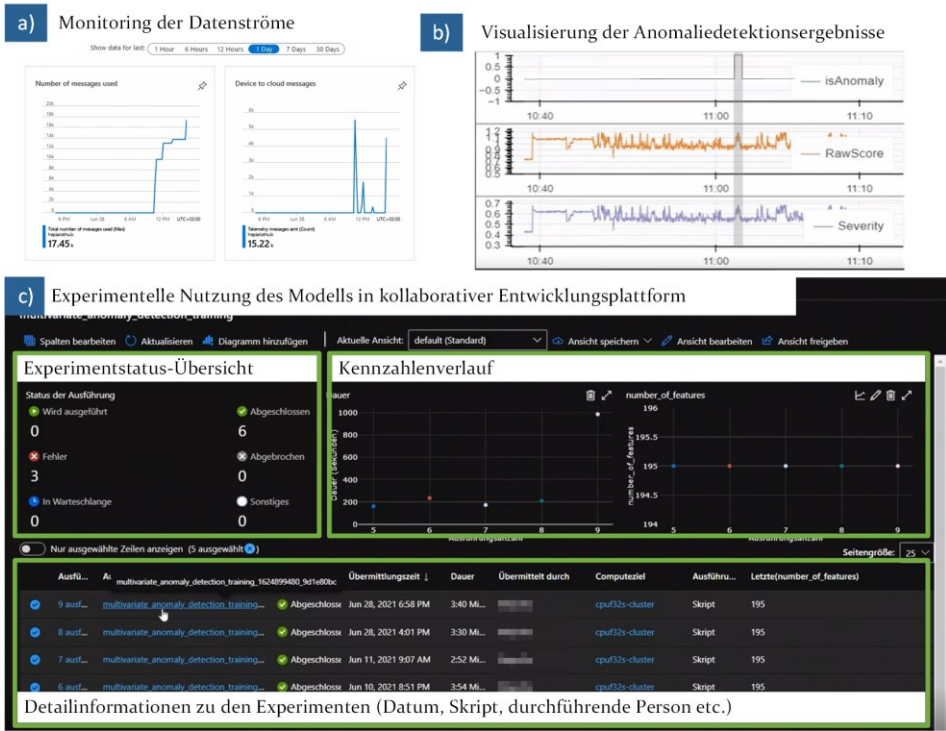
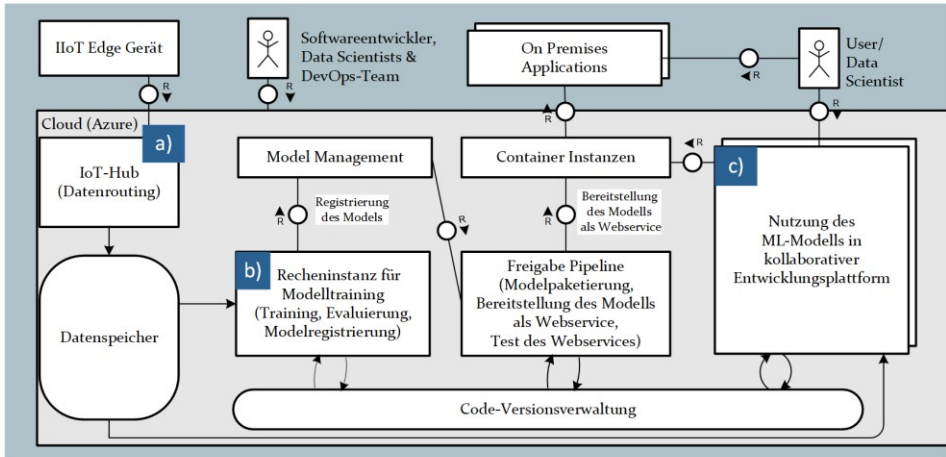


Bild 72: Konzept einer cloudbasierten KI-Anwendung auf Basis der MLOPS-Methodik sowie graphische Veranschaulichung der Umsetzungsergebnisse

Die Bewertungen des Abdeckungsgrads der Methodik bzgl. der auf das aktuelle Szenario zutreffenden inhaltlichen Anforderungen sind in Tabelle 17 aufgelistet.

Tabelle 17: Bewertung des Abdeckungsgrades inhaltlicher Anforderungen von Szenario 5

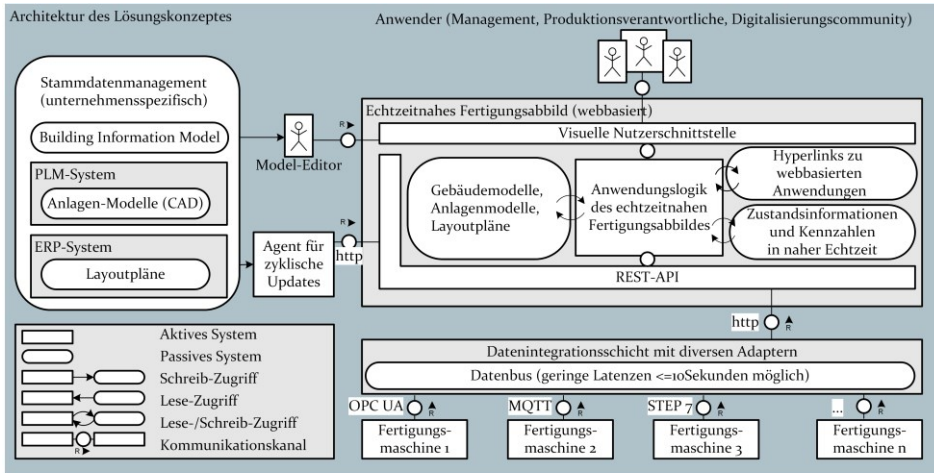
Inhaltliche Anforderung	Bewertung	Begründung	Referenz	
PM2.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Aufzeigen der Notwendigkeit der Berücksichtigung nicht monetärer Zielgrößen bei der Priorisierung und Nutzenprognose strategischer Befähigungsprojekte 	Kapitel 4.1.3, Kapitel 4.2.2	
PM2.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Erkenntnis der Notwendigkeit einer Ende-zu-Ende Betrachtungsweise digitaler Lösungen 	Alle Kapitel	
PM3.3	●	<ul style="list-style-type: none"> Nutzung von Kollaborationen zum unternehmensinternen Wissensaufbau Bedarfsgetriebener Einbezug von Spezialisten-Teams während der Umsetzung 	Kapitel 4.3.2, Kapitel 4.4.2	
FD1.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Förderung des Wissensaufbaus verschiedener unternehmensinterner Stakeholder durch systematische Einordnung sowie Darlegung der Kausalkette des strategisch motivierten Themas 	Alle Kapitel	
FD2.3	●	<ul style="list-style-type: none"> Aufbau einer interdisziplinären Zusammenarbeit durch den Austausch in Digitalisierungscommunities im Rahmen von agilen Entwicklungsprojekten 	Kapitel 4.4.2	
○ nicht abgedeckt	◐ teilweise abgedeckt	◑ grundlegend abgedeckt	● ausführlich abgedeckt	● umfassend abgedeckt

5.6 Szenario 6: Digitales Echtzeitabbild

Während digitale Lösungen einerseits die Beherrschbarkeit komplexer Systeme verbessern, bilden sie andererseits ein schwer zu überblickendes Netzwerk an Informationen und Applikationen. Um Mitarbeitenden einen Gesamtüberblick über existierende Lösungen zu ermöglichen, wurde ein echtzeitnahes Fertigungsabbild nach dem Entwicklungsparadigma des Digitalen Zwillings eingesetzt. Bild 73 zeigt das hierzu entwickelte Lösungskonzept.

Unter Verwendung der webbasierten Anwendung IntoSite der Siemens AG wird basierend auf CAD-Modellen der digitalen Fabrik ein vereinfachtes Modell des Werkes und der darin befindlichen Produktionsanlagen erstellt. Dynamische Anpassungen am Produktionslayout können manuell durch Importvorgänge zyklisch oder automatisiert über eine Anbindung an das PDM-System erfolgen.

5 Validierung



Screenshots des umgesetzten Fertigungsabbildes



Bild 73: Entwickeltes Lösungskonzept sowie graphische Illustration der Umsetzungsergebnisse [P6]

An den Anlagen lassen sich mittels sog. dynamischer Placemarks relevante Informationen für den Produktionsbetrieb, wie etwa Kennzahlen, Wartungsmeldungen und Zustandsinformationen, anzeigen. Diese Informationen werden über eine Datenintegrationsschicht, z.B. unter Verwendung eines Message-Brokers, lose mit der Anwendung gekoppelt. Neben den echtzeitnahen Informationselementen lassen sich existierende digitale Lösungen, wie z.B. Anlagendokumentationen, webbasierte Anwendungen und Dashboards, im Modell mittels Referenzierungen verorten [S9, S10]. Die Aktualisierung und Erweiterung derselben wird durch die Anwendenden selbst vorgenommen. Das dezentral vorliegende Wissen über sich dynamisch entwickelnde Lösungen wird somit auf transparente Weise gebündelt und von anderen Mitarbeitenden intuitiv aufgenommen.

Die Bewertungen des Abdeckungsgrads der Methodik bzgl. der auf das aktuell beschriebene Szenario zutreffenden inhaltlichen Anforderungen sind in Tabelle 18 aufgelistet.

Tabelle 18: Bewertung des Abdeckungsgrads inhaltlicher Anforderungen von Szenario 6

Inhaltliche Anforderung	Bewertung	Begründung	Referenz
PM1.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Systematische Reduktion von Unsicherheiten durch Voruntersuchungen bzgl. der Machbarkeit 	Kapitel 4.3.2, Kapitel 4.4.2
PM2.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Förderung und Forderung übergreifender Denkmuster durch Partizipation und Anwendung der Lösung 	Kapitel 4.3.1
PM3.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Nutzung des kollektiven Bewusstseins zur Erkennung der Intransparenz des Ausgangszustands als Anlass 	Kapitel 4.5.1
FD1.1	●	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserte Orientierungsfähigkeit beteiligter Stakeholdergruppen während des Digitalisierungsvorhabens von der Ideenfindung bis zum Einsatz der Lösung 	Alle Kapitel
FD2.2	●	<ul style="list-style-type: none"> Darlegung der Notwendigkeit der Lösung anhand ganzheitlicher Betrachtung des Digitalen Ökosystems 	Kapitel 4.2.2

○ nicht abgedeckt	◐ teilweise abgedeckt	◑ grundlegend abgedeckt	● ausführlich abgedeckt	● umfassend abgedeckt
-------------------	-----------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------

5.7 Evaluierung formaler Anforderungen

Im aktuellen Unterkapitel werden die Bewertungsergebnisse der DMAICS-Methodik hinsichtlich der in Kapitel 3.2 definierten formalen Gütekriterien betrachtet und diskutiert. Dabei wurde je Fallstudie der Erfüllungsgrad der Objektivität, Validität und Utilität der Methodik durch eine Befragung projektbeteiligter Personen erhoben und ein Durchschnittswert ermittelt. Die Bewertung der Reliabilität resultiert aus der Gesamtschau aller Szenarien, da keine wiederholte Anwendung der Methodik auf das gleiche Szenario im Rahmen der Untersuchungen möglich war. Die Bewertungsergebnisse sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Bewertung der DMAICS-Methodik hinsichtlich des Erfüllungsgrades formaler Gütekriterien

Formale Anforderung	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6	Ø
Objektivität	●	●	●	◐	●	◐	●
Validität	●	●	●	●	●	●	●
Utilität	●	●	●	●	●	●	●
Reliabilität	● (Bewertung in Gesamtschau aller Szenarien)						●

○ nicht erfüllt ◐ teilweise erfüllt ◑ grundlegend erfüllt ● weitgehend erfüllt ● vollständig erfüllt

Objektivität: Anhand der Bewertungsergebnisse wird ersichtlich, dass die Anwendung der Methodik weitgehend aber nicht vollständig objektiv ist. In den Szenarien 2-6 zeigte sich eine Beeinflussbarkeit des Endergebnisses durch den anwendenden Personenkreis. Die Methodik systematisiert alle Vorgänge von der Ideenfindung bis zur Nutzung digitaler Lösungen, leitet diese methodisch an und stellt die Durchführungsqualität an kritischen Entscheidungspunkten mittels Mehrpersonen-Reviews sicher. Dennoch bieten sich in gewissen Entscheidungs- bzw. Durchführungsschritten Interpretations- und Handlungsfreiräume für die subjektive Einflussnahme. Beispiele sind die Festlegung eines Lösungsansatzes durch die Auswahl einer von mehreren gleichwertigen Lösungsalternativen (siehe Szenario 6) oder stark technisch bzw. anwendungsfallspezifisch geprägten Umsetzungsaufgaben, wie etwa dem Antrainieren eines domänenspezifischen KI-Modells (siehe Szenario 4).

Validität: Die Validität der Methodik ist vollständig gegeben, da die Methodik ein durchgängiges Gefüge aus operativen und strategischen Vorgehensweisen verschiedener Fachgebiete bildet. Um ein generisches und

handhabbares Rahmenwerk für die Digitalisierung zu formen, wird der Fokus auf diejenigen Kernaktivitäten gelegt, welche einen klar zu benennenden Beitrag zur Digitalisierung leisten. Denkbare Nebenaktivitäten, wie etwa Weiterbildungsinitiativen oder die Ausbildung von Digitalisierungs-Communities, stehen zwar im Einklang mit, sind jedoch nicht integraler Bestandteil, der DMAICS-Methodik. Eine weitere Verkürzung der Realität stellt die Annahme eines rein rationalen Agierens aller Akteure in den Teilaktivitäten dar. Sozialpsychologische Effekte werden dabei nicht betrachtet. Stattdessen wurde der Ansatz gewählt, durch die Methodik ein Regelwerk an Abläufen und Prüfschritten zur Vorbeugung von Interessenskonflikten zu definieren. Dieses stellt sicher, dass betroffene Stakeholdergruppen rechtzeitig in Review- bzw. Entscheidungsprozesse eingebunden und einzelne Bereichsziele im Rahmen der strategischen Umsetzungsplanung auf die gleiche übergeordnete Zielrichtung abgestimmt werden.

Utilität: Die Methodik bietet eine Orientierungshilfe zur Einordnung von operativen und strategischen Teilaktivitäten sowie deren notwendigen Vorbedingungen und Schnittstellen. Die Durchführungsqualität dieser Teilaktivitäten wird mittels einer methodischen Anleitung, Vollständigkeitsprüfungen, bspw. Checklisten, und entsprechenden Kontrollpunkten erhöht. Folglich wird das initiale Ziel einer effektiveren und effizienteren Digitalisierung erreicht, wodurch sich die Methodik als nützlich erweist. Insbesondere wird der Methodik durch die befragten Personen eine Reduktion bzw. Prävention diverser Effizienzverluste zugeschrieben. Dies erfolgt durch die weitgehende Prävention von Interessenskonflikten, der Reduktion von Aufwänden zur Transparenzgewinnung und der Vermeidung redundanter, gegensätzlicher bzw. nicht zielführender Arbeitsschritte. Die Methodik harmonisiert die Denk- und Handlungsmuster innerhalb der einzelnen Phasen als auch phasenübergreifend. Die durchgängige Erfassung der Kausalketten und die Verwendung von Rückkopplungsmechanismen bestärkt den Aufbau einer nachhaltigen, kollektiven Lernerfahrung zum Thema Digitalisierung im Unternehmen.

Reliabilität: Aus der Gesamtschau aller Digitalisierungsaktivitäten wird ersichtlich, dass in jedem der untersuchten Fallstudien ein Effektivitäts- bzw. Effizienzgewinn verzeichnet werden konnte. Dies ist insbesondere auf die zielgerichtete Harmonisierung komplexer Digitalisierungsabläufe und die Erhöhung der Durchführungsqualität der einzelnen Unteraufgaben zurückzuführen. Wie hoch diese Effektivitäts- bzw. Effizienzgewinne ausfallen, ist jedoch in Teilen von dem jeweiligen Anwenderkreis (siehe Gütekriterium der Objektivität) abhängig. Die Methodik wird damit abschließend als weitgehend zuverlässig bewertet.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Digitalisierung stellt einen zentralen Faktor zur Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen dar und zeigt sich dabei als Chance, wie auch als Herausforderung. Auf der einen Seite entstehen neue Geschäftsmodelle durch die Vernetzung von Produkten, Prozessen und Anlagen. Hinzu kommt, dass steigende Komplexität, wie etwa bei der Herstellung kundenindividueller Produkte, beherrschbar wird. Produktionseffizienz und -qualität lassen sich durch den Einsatz informationsverarbeitender Technologien verbessern. Auf der anderen Seite steigt die Gesamtkomplexität des Fertigungsumfelds durch die Einbringung neuer Systeme und Technologien. Durch die zunehmende Vernetzung entstehen zusätzliche Abhängigkeiten. Nicht zuletzt erfordert eine volle Entfaltung der Digitalisierung auch einen kulturellen Wandel, welcher sich in veränderten Kompetenzprofilen sowie neuen Denk- und Arbeitsweisen äußert.

Digitalisierung ist ein fortlaufender Veränderungsprozess, bei dem die Entscheidungen und Handlungen aller involvierten Akteure zur Vermeidung von Effektivitäts- und Effizienzverlusten zu harmonisieren sind. Um dies zu erreichen, hat die in der vorliegenden Dissertationsschrift verfasste Methodik den Anspruch die elementaren Vorgänge der Digitalisierung vollständig zu systematisieren und methodisch auszugestalten. Das entwickelte DMAICS-Vorgehensmodell gliedert die Methodik in fünf Phasen sowie eine sog. Standardize-Schale, welche koordinierende Tätigkeiten bündelt (vgl. Kapitel 3). Ein detailliertes und konsistentes Gesamtsystem wird geschaffen, indem aufeinander abgestimmte Prozessmodelle unter Verwendung der Spezifikationsprache BPMN 2.0 abgebildet werden. Zur Wahrung der Erweiterbarkeit wird die methodische Ausgestaltung von der prozesstechnischen Abfolge entkoppelt. Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur Spezifikation einer Implementierungsgrundlage eines Informationssystems für die Digitalisierung in produzierenden Unternehmen.

Die Methodik integriert wissenschaftliche Erkenntnisse aus den Bereichen Industrie 4.0, Produktionssystematik, Systems Engineering und weiterer angrenzender Forschungsgebiete (vgl. Bild 21) und erweitert diese durch neue interdisziplinäre Methoden. Hierdurch wird unter Verwendung einer einheitlichen Terminologie ein durchgängiger, anwendungsagnostischer Orientierungsrahmen für alle Akteure entlang des Digitalisierungszyklus geschaffen. Der gewählte stakeholderzentrierte Ansatz führt zu einer hohen Identifikation und Akzeptanz von Digitalisierungslösungen, bei dem ein Maximum des im Unternehmen verteilten Wissens genutzt wird.

Mittels gemeinsamer Entscheidungsprozesse durch Vertretende verschiedener Anspruchsgruppen wird eine ganzheitliche Betrachtungsweise gefördert sowie der Entstehung von isolierten Lösungen entgegengewirkt. Durch die Vereinigung von Individualinteressen und kollektiven Firmeninteressen werden Strategiemuster verschiedener Unternehmensbereiche harmonisiert und Interessenskonflikte präventiv verhindert. Ausgehend von Innovationsideen werden Handlungsfelder der Digitalisierung fortlaufend erfasst und systematisch in einer strategische Umsetzungsplanung aufgenommen (vgl. Kapitel 4.1 & 4.2). Die Operationalisierung der firmeneigenen Digitalisierungsstrategie beginnt bei der interdisziplinären Konzeptentwicklung, für welche ein abgewandeltes 4+1 Sichtenmodell eingesetzt wird (vgl. Kapitel 4.3.1). Für die anschließende Umsetzung der entwickelten Digitalisierungskonzepte werden geeignete Projektkonstellationen gebildet und die notwendigen projektspezifischen Rahmenbedingungen für eine effiziente Entwicklung geschaffen (vgl. Kapitel 4.3.2 & 4.3.3). Unsicherheiten zur Projektlaufzeit, welche insbesondere auf die technische Komplexität sowie den emergenten Charakter des Produktionsbereichs zurückzuführen sind, wird mit dem gezielten Einsatzes agiler Arbeitsweisen begegnet (vgl. Kapitel 4.4). Entlang des Digitalisierungszyklus werden die Kausalketten zur Schaffung der notwendigen Transparenz und Rückverfolgbarkeit dokumentiert. Somit lassen sich Digitalisierungsaktivitäten retrospektiv bezüglich ihrer Effektivität und Effizienz bewerten (vgl. Kapitel 4.5). Zugleich wird eine kollektive Lernerfahrung in Unternehmen für weitere Iterationszyklen der Digitalisierung befähigt.

Die Evaluierung der Methodik erfolgt anhand von praktischen Fallstudien in insgesamt sechs Validierungsszenarien, welche die drei Basistechnologien IoT, Data Analytics und Cloud Computing umfassen. Auf Basis von Befragungen der involvierten Akteure wird der Abdeckungsgrad *inhaltlicher Anforderungen* (vgl. Kapitel 2.3.4) durch die Methodik bewertet und anschließend ein Fazit bzgl. der vier *formalen Anforderungen* (vgl. Kapitel 3.2) der Validität, Objektivität, Utilität und Reliabilität gezogen. Im Kontext des IoTs werden mittels eines Retrofittingansatzes sowie unter Einsatz anlagenexterner Sensoriken neue Funktionalitäten zur Prozessüberwachung geschaffen. Die entwickelten Lösungen zielen dabei auf eine Optimierung der Produktionseffizienz und -qualität ab. Die Validierungsszenarien des Analytic-Bereichs zeigen den asynchronen sowie den prozessbegleitenden Einsatz von KI-Modellen im Fertigungskontext auf. Zur asynchronen Anwendung wird ein CNN-basierter Segmentierungsalgorithmus zur Gewinnung von Informationen über Oberflächencharakteristiken von Bauteilen eingesetzt. Bei der prozessbegleitenden Verwendung wird

ein hybrider Ansatz aus einer Kombination von Deep Learning sowie klassischem maschinellen Lernen verfolgt, welcher eine Erklärbarkeit der Prädiktionen gewährleistet. Die entwickelte Lösung führt zu einer Reduktion von Prozesszeiten. Weiterhin wird die Nutzung von Cloud-Lösungen im Produktionskontext pilotiert. Die MLOPS-Methodik wird unter Verwendung eines vortrainierten Modells zur Anomaliedetektion in multivariaten Sensordaten plattformbasiert angewandt. Der Fokus des Projektes lag auf dem methodischen und technischen Kompetenzaufbau, um die Vorteile der plattformbasierten Entwicklung, wie die verbesserte Kollaborationsfähigkeit, in der praktischen Anwendung zu erschließen. Für die Umsetzung eines digitalen Fertigungsabbildes nach dem Entwicklungsparadigma des Digitalen Zwillings wurde ein dreidimensionales Modell einer Produktionsanlage in einer webbasierten Anwendung erstellt sowie mittels produktionsrelevanter Informationen nahe Echtzeit angereichert. Das echtzeitnahe Fertigungsabbild dient der Komplexitätsbeherrschung, indem Informationen verschiedener Aggregationslevel in umfassender und zugleich intuitiver Weise zugänglich gemacht werden.

Zusammenfassend lässt sich auf Basis der formalen Validierungsergebnisse folgendes Gesamtfazit ziehen: Die Validität der Methodik konnte in verschiedenen Digitalisierungsszenarien mit unterschiedlicher Projektgröße als auch technischer und sozialer Komplexität nachgewiesen werden. Das Gütekriterium der Objektivität wird als weitgehend erfüllt betrachtet, da Prozessabfolgen und Schnittstellen anwenderunabhängig strukturiert und definiert sind. Jedoch können Entscheidungen, die auf Grundlage subjektiver Abwägungen getroffen werden, durch die Kompetenzen, Fähigkeiten und Verhandlungsstärke der involvierten Akteure beeinflusst werden. Die Utilität der Methodik wird als hoch angesehen, da sie einen umfassenden und zugleich handhabbaren Orientierungsrahmen unter Verwendung einer einheitlichen Sprache schafft. Mit der Einschränkung der Beeinflussbarkeit durch den Anwenderkreis wird die Reliabilität der Methodik als hoch eingestuft. Aufgrund des hohen Abdeckungs- bzw. Erfüllungsgrades inhaltlicher und formaler Anforderungen lässt sich abschließend und in Hinblick auf die eingangs formulierte These feststellen, dass der DMAICS-Zyklus den komplexe Transformationsprozess der Digitalisierung im Produktionsbereich vollumfänglich und anwendungsagnostisch umsetzt. Die Spezifikation der Methodik reicht dabei so weit, dass sich diese als Implementierungsgrundlage für ein softwaregeführtes Informationssystem zur Digitalisierung in Unternehmen eignet (siehe Kapitel 4.5.2).

Die Ergebnisse implizieren weiteren Forschungsbedarf. Die Spezifikation und Erfassung aller Informationsartefakte des Digitalisierungsprozesses schafft eine standardisierte Wissensbasis, welche in Kombination mit dem Einsatz künstlicher Intelligenz neue Optimierungspotentiale ermöglicht [235]. Zur verbesserten Interaktion mit dieser Wissensbasis bspw. zur Beantwortung von Fragen, dem Auffinden von Informationen oder dem Erhalten von Empfehlungen ist eine chatbasierte Interaktion zu realisieren. Aufgrund der neuesten Fortschritte in dem Bereich großer Sprachmodelle (engl. Large Language Models) kommt man dem Konzept einer Künstlichen Allgemeinen Intelligenz schrittweise näher [236]. Die (Teil)-Automatisierbarkeit einiger der durch die DMAICS-Methodik spezifizierten Unteraktivitäten der Digitalisierung ist zu evaluieren. Konkrete Potentiale bieten sich bei der kontextuellen Ideenfindung, der KI-unterstützten Lastenhefterstellung oder der assistierten Softwarecodegenerierung im Bereich des Anlagenengineerings [237, 238].

7 Summary and Outlook

Digitalization plays a key role for the competitiveness of manufacturing companies, presenting both opportunities and challenges. On one hand, new business models emerge through the integration of products, processes, and facilities. Additionally, the increasing complexity, caused by the demand of individualized products, becomes manageable. Production efficiency and quality can be improved through the use of information technologies. On the other hand, the overall complexity of the manufacturing environment increases with the introduction of new systems and technologies. The growing interconnectivity also leads to additional dependencies. Furthermore, the realization of digitalization potentials requires a cultural shift, reflected in changed competency profiles and new ways of thinking and working.

Digitalization is an ongoing transformation process that requires harmonized actions and decision making of all involved stakeholders to avoid losses in effectiveness and efficiency. To achieve this, the methodology presented in this thesis aims to systematically organize the fundamental processes of digitalization and guide them methodically. The DMAICS procedural model is composed of five phases and an overarching Standardize layer that consolidates coordinating activities (see Chapter 3). A detailed and consistent system is established using the Business Process Model and Notation 2.0 (BPMN 2.0) language specification. To ensure extensibility, the methodological design is decoupled from the process model. Hereby, the work contributes to specifying an implementation basis for an information system for digitization in manufacturing companies.

The methodology integrates scientific findings from the research fields Industry 4.0, production systematics, systems engineering (refer to Figure 21), and extends these with new interdisciplinary methods. A consistent, application-agnostic framework is created including all stakeholders along the digitalization cycle using a uniform terminology. The chosen stakeholder-centric approach leads to high identification with and acceptance of digitalization solutions, utilizing the maximum amount of knowledge distributed within the company.

Through collective decision-making processes involving representatives from various stakeholder groups, a holistic perspective is promoted, and the emergence of isolated solutions is countered. By aligning individual interests with collective interests, strategic patterns across different company

divisions are harmonized, and conflicts of interest are preemptively prevented. Starting from innovative ideas, digitalization action fields are continuously captured and systematically incorporated into strategic implementation planning (Chapters 4.1 & 4.2). The operationalization of the company's digitalization strategy begins with interdisciplinary concept development, for which a modified 4+1 Views Model is used (Chapter 4.3.1). For the subsequent implementation of developed digitalization concepts, suitable project configurations are formed, and the necessary project-specific conditions for efficient development are established (Chapters 4.3.2 & 4.3.3). Uncertainties related to project duration, particularly due to technical complexity and the emergent nature of the production sector, are addressed with the targeted use of agile working methods (refer to Chapter 4.4). Causal chains are documented throughout the digitalization cycle to create necessary transparency and traceability, allowing retrospective evaluation of digitalization activities in terms of their effectiveness and efficiency (refer to Chapter 4.5). This also enables collective learning experiences in companies for further iterations of digitalization.

The evaluation of the methodology is conducted through practical case studies across six validation scenarios, which encompass the three core technologies of IoT, Data Analytics, and Cloud Computing. Based on surveys of the involved stakeholders, the methodology's coverage of content requirements is assessed (see Chapter 2.3.4), and conclusions are drawn regarding the four formal requirements of validity, objectivity, utility, and reliability (see Chapter 3.2). Within the context of IoT, new functionalities for process monitoring are created using a retrofitting approach and the deployment of external sensors, with the developed solutions targeting optimization of production efficiency and quality. The validation scenarios in the analytics domain demonstrate both asynchronous and process-accompanying uses of AI models within the manufacturing context. For asynchronous application, a CNN-based segmentation algorithm is used to gather information on the surface characteristics of components. The process-accompanying approach employs a hybrid method combining Deep Learning and traditional machine learning to ensure explainability of predictions, leading to reduced process times. Furthermore, the use of cloud solutions in the production context is piloted. The MLOps methodology is applied platform-based using a pretrained model for anomaly detection in multivariate sensor data. The project's focus was on building methodological and technical competencies to unlock the benefits of platform-based development, such as improved collaboration capabilities, in practical application. For the realization of a digital manufacturing representation following the

development paradigm of the Digital Twin, a three-dimensional model of a production facility was created within a web-based application and enriched with production-relevant information in near-real-time. This near-real-time manufacturing representation serves to manage complexity by making information at various aggregation levels comprehensively and intuitively accessible.

In summary, based on the validation results, the following overall conclusion can be drawn: The validity of the methodology has been demonstrated in various digitalization scenarios with differing project sizes as well as technical and social complexities. The criterion of objectivity is considered largely met, as process sequences and interfaces are structured and defined independently of the user. However, decisions based on subjective considerations can be influenced by the competencies, abilities, and negotiation strength of the involved stakeholders. The utility of the methodology is regarded as high since it creates a comprehensive yet manageable framework using a uniform language. With the limitation of influence by the user group, the reliability of the methodology is rated as high. Due to the high degree of coverage or fulfillment of content and formal requirements, it can be concluded that the DMAICS cycle comprehensively and application-agnostically implements the complex transformation process of digitalization in the manufacturing sector. The specification of the methodology is extensive enough that it can serve as the basis for implementing a software-driven information system for digitalization in companies (Chapter 4.5.2).

The results imply further research demand. The specification and documentation of all information artifacts within the digitalization process create a standardized knowledge base that, when combined with the use of large language models, opens new optimization potentials [235]. To enhance interaction with this knowledge base - for example, to answer questions, locate information, or receive recommendations - a chat-based interaction may increase efficiency. Further optimization potential lies in the ongoing automation of certain sub-activities specified by the DMAICS methodology. Specifically in the areas of contextual idea generation, AI-supported document generation, such as requirement and design specifications, or assisted software development within the field of systems engineering [237, 238].

Literaturverzeichnis

- [1] FRANK, A.G., L.S. DALENOGARE und N.F. AYALA. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies [online]. *International Journal of Production Economics*, 2019, **210**, S. 15-26. ISSN 09255273. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijpe.2019.01.004
- [2] WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ, BMWK - BUNDESMINISTERIUM FÜR. *Digitale Transformation in der Industrie* [online]. 19 Mai 2023 [Zugriff am: 19. Mai 2023]. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/industrie-40.html>
- [3] PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. *Was ist Industrie 4.0?* [online]. 5 März 2022 [Zugriff am: 5. März 2022]. Verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>
- [4] DÖRRIES, F., M. WICHERING und W. KERSTEN. Das Change Management weiterentwickeln [online]. *Industrie 4.0 Management*, 2021, **2021**(1), S. 50-54. ISSN 23649208. Verfügbar unter: doi:10.30844/I40M_21-1_S50-54
- [5] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. *Industrie 4.0 und Digitale Wirtschaft* [online]. *Impulse für Wachstum, Beschäftigung und Innovation* [Zugriff am: 26. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/1/industrie-4-0-und-digitale->
- [6] ARNOLD, C., D. KIEL und K.-I. VOIGT. How Industry 4.0 changes business models in different manufacturing industries. In: *27th ISPIM Innovation Conference, Porto, Portugal, (June), 2016*, S. 1-20
- [7] HESS, T., C. MATT, A. BENLIAN und F. WIESBÖCK. Options for Formulating a Digital Transformation Strategy. *MIS Quarterly Executive*, 2016, **15**
- [8] BENDEL, O. Definition: Digitalisierung [online]. *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 13. Juli 2021 [Zugriff am: 18. März 2023]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitalisierung-54195/version-384620>

- [9] HABERFELLNER, R. *Zur Digitalisierung der Arbeitswelt: Globale Trends-europäische und österreichische Entwicklungen*, 2015
- [10] HINTERSEER, T. *Industrie 4.0: Revolution oder Evolution? Wirtschafts- und Sozialpolitische Zeitschrift*, 2016, **1**, S. 157-172
- [11] BULLINGER-HOFFMANN, A. *Zukunftstechnologien und Kompetenzbedarfe*: Springer Berlin Heidelberg, 2019. ISBN 978-3-662-54951-3
- [12] ROUCOULES, L. und N. ANWER. Coevolution of digitalisation, organisations and Product Development Cycle [online]. *CIRP Annals*, 2021, **70**(2), S. 519-542. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirp.2021.05.003
- [13] Verein Deutscher Ingenieure e. V. VDI 4499:2008, *Digitale Fabrik - Grundlagen*: Beuth Verlag GmbH
- [14] SAUER, O. Trends bei Manufacturing Execution Systemen (MES) am Beispiel der Automobilindustrie. *PPS Management*, 2005, **10**, S. 21-24
- [15] KATCH, V.L., W.D. MCARDLE und F.I. KATCH. *Essentials of exercise physiology*. 4th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins Health, 2011. ISBN 1451103239
- [16] ENRIQUE, B. und B. MARTA. Efficacy, Effectiveness and Efficiency in the Health Care: The Need for an Agreement to Clarify its Meaning [online]. *International Archives of Public Health and Community Medicine*, 2020, **4**(1). Verfügbar unter: doi:10.23937/2643-4512/1710035
- [17] RUBINSTEIN-SALZEDO, S. Big O Notation and Algorithm Efficiency. In: S. RUBINSTEIN-SALZEDO, Hg. *Cryptography*. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 75-83. ISBN 978-3-319-94817-1
- [18] GRUNDMANN, W. und R. RATHNER. Ökonomisches Prinzip. In: W. GRUNDMANN und R. RATHNER, Hg. *Bankwirtschaft, Rechnungswesen und Steuerung, Wirtschafts- und Sozialkunde. Prüfungswissen in Übersichten*. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler, 2018, S. 355. ISBN 9783658198664
- [19] DRUCKER, P.F. Managing for business effectiveness. *Harvard Business Review*, 1963

- [20] BALZERT, H. Der Software-Lebenszyklus. In: H. BALZERT, Hg. *Lehrbuch der Softwaretechnik: Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011, S. 1-4. ISBN 978-3-8274-1706-0
- [21] SOPHIST-GESELLSCHAFT FÜR INNOVATIVES SOFTWARE-ENGINEERING. *Requirements-Engineering und -Management. Aus der Praxis von klassisch bis agil*. 6., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser, 2014. ISBN 9783446438934
- [22] HULL, E., K. JACKSON und J. DICK. *Requirements Engineering*. London: Springer London, 2011. SpringerLink Bücher. ISBN 9781849964050
- [23] WIEGERS, K. und J. BEATTY. *Software requirements*. 3. ed. [fully updated and expanded]. Redmond, Wash.: Microsoft Press, 2013. Best practices. ISBN 9780735679665
- [24] SHAW, M. und D. GARLAN. *Software architecture. Perspectives on an emerging discipline*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996. An Alan R. Apt book. ISBN 0131829572
- [25] REUSSNER, R. und W. HASSELBRING, Hg. *Handbuch der Software-Architektur*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2006. ISBN 3898643727
- [26] SOWMYA, S.K., P. DEEPIKA und J. NAREN. Layers of cloud-IaaS, PaaS and SaaS: a survey. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2014, 5(3), S. 4477-4480
- [27] BERNARD, P. *COBIT® 5 - A Management Guide*: Van Haren, 2012. ISBN 9789087538002
- [28] SHAIKH, M., A. KHAN, I.F. SIDDIQUI und Z. QURESHI. Comparative Analysis of Trending Agile Model Tools for Software Development Life Cycle. In: *The 13th International Conference on Internet (ICONI)*, 2021
- [29] SONI, M. *DevOps Bootcamp*. Sebastopol, CA: Packt Publishing; O'Reilly Media Inc, 2017. ISBN 9781787282230
- [30] TREVEIL, M. *MLOps - Kernkonzepte im Überblick. Machine-Learning-Prozesse im Unternehmen nachhaltig automatisieren und skalieren*. [Köln]: O'Reilly Verlag, 2021. Animals. ISBN 9783960105800

- [31] GRAESSLER, I. und J. HENTZE. The new V-Model of VDI 2206 and its validation [online]. *at - Automatisierungstechnik*, 2020, **68**(5), S. 312-324. ISSN 0178-2312. Verfügbar unter: doi:10.1515/auto-2020-0015
- [32] BUSSCHE, A. von dem und P. VOIGT. *EU-Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO): Praktikerhandbuch*: Springer, 2018. ISBN 978-3-662-56186-7
- [33] VAN BON, J. *Service design basierend auf ITIL V3. Eine Management Guide*. Zaltbommel: Van Haren Publ, 2008. Learn ITIL V3. ISBN 9789087531591
- [34] KRAFCIK, J.F. Triumph of the lean production system. *Sloan management review*, 1988, **30**(1), S. 41-52
- [35] DOMBROWSKI, U. und T. MIELKE. *Ganzheitliche Produktionssysteme: Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*: Springer-Verlag, 2015
- [36] Verein Deutscher Ingenieure e.V. VDI 2870 Blatt 1:2012-07: Juli 2012, *Ganzheitliche Produktionssysteme - Grundlagen, Einführung und Bewertung*. Berlin: Beuth Verlag
- [37] HERMANN, M., T. PENTEK und B. OTTO. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*: IEEE, 2016, S. 3928-3937. ISBN 978-0-7695-5670-3
- [38] MAYR, A., M. WEIGELT, A. KÜHL, S. GRIMM, A. ERLI, M. POTZEL und J. FRANKE. Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0 [online]. *Procedia CIRP*, 2018, **72**, S. 622-628. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2018.03.292
- [39] DOMBROWSKI, U., T. RICHTER und P. KRENKEL. Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems: A Use Cases Analysis [online]. *Procedia Manufacturing*, 2017, **11**, S. 1061-1068. ISSN 23519789. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.217
- [40] SCHUMACHER, S., A. BILDSTEIN und T. BAUERNHANSL. The Impact of the Digital Transformation on Lean Production Systems [online]. *Procedia CIRP*, 2020, **93**, S. 783-788. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2020.03.066

- [41] BERTAGNOLLI, F. *Lean Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN 978-3-658-13123-4
- [42] OHNO, T. *Toyota production system: beyond large-scale production*: crc Press, 1988
- [43] MONOSTORI, L., et al. Cyber-physical systems in manufacturing [online]. *CIRP Annals*, 2016, 65(2), S. 621-641. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirp.2016.06.005
- [44] FLEISCHMANN, H. *Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme*. Erlangen: University Press, 2019. FAU Studien aus dem Maschinenbau. Band 355
- [45] MINOLI DANIEL. Internet of Things Definitions and Frameworks. In: *Building the Internet of Things with IPv6 and MIPv6: The Evolving World of M2M Communications*, 2013, S. 28-47
- [46] MELL, P., T. GRANCE und OTHERS. The NIST definition of cloud computing, 2011
- [47] MORGAN, G.A. Data Coding and Exploratory Analysis (EDA) Rules for Data Coding Exploratory Data Analysis (EDA) Statistical Assumptions. In: *SPSS for Intermediate Statistics*: Routledge, 2004, S. 42-67
- [48] LANEY, D. 3D Data management: Controlling data volume, velocity and variety. Meta Group. *Lakshen, Guma Abdulkhader*, 2001, S. 1-4
- [49] LACHENMAIER, J.F. Definition: Informationstechnologie (IT) [online]. *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 9. April 2020 [Zugriff am: 7. März 2022]. Verfügbar unter: <https://www.gabler-banklexikon.de/definition/informationstechnologie-it-58827>
- [50] GARTNER. *Definition of Operational Technology (OT) - Gartner Information Technology Glossary* [online]. 7 März 2022 [Zugriff am: 7. März 2022]. Verfügbar unter: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/operational-technology-ot>

- [51] NISSEN, V., Hg. *Service-orientierte Architekturen. Chancen und Herausforderungen bei der Flexibilisierung und Integration von Unternehmensprozessen*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2008. Springer eBook Collection Business and Economics. ISBN 9783834996367
- [52] WELLERSHOFF, S. Mobiles Arbeiten gefährdet die IT-Sicherheit [online]. *springerprofessional.de*, 9. März 2020 [Zugriff am: 6. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/risikomanagement/it-sicherheit/mobiles-arbeiten-gefaehret-die-it-sicherheit/17587064>
- [53] CABRIC, M. Confidentiality, Integrity, and Availability. In: M. CABRIC, Hg. *Corporate Security Management. Challenges, Risks, and Strategies*. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2015, S. 185-200. ISBN 9780128029343
- [54] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 62264-1, *Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Teil 1: Modelle und Terminologie*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [55] ANDREU, A. Operational technology security – a data perspective [online]. *Network Security*, 2020, 2020(1), S. 8-13. ISSN 1353-4858. Verfügbar unter: doi:10.1016/S1353-4858(20)30008-8
- [56] BILDSTEIN, A. und J. SEIDELMANN. Migration zur Industrie 4.0-Fertigung. In: B. VOGEL-HEUSER, T. BAUERNHANSL und M. ten HOMPEL, Hg. *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1: Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 227-242. ISBN 978-3-662-45279-0
- [57] MEUDT, T., P. MALTE und J. METTERNICH. Die Automatisierungspyramide - Ein Literaturüberblick, 2017
- [58] BERGMANN, L. Industrie 4.0: Die OT-Security-Lücke schließen [online]. *Industry of Things*, 31. Oktober 2019 [Zugriff am: 18. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://www.industry-of-things.de/industrie-40-die-ot-security-luecke-schliessen-a-876818/>
- [59] KLINDT, T. und H.-J. OSTERMANN. *Die neue EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG*. 2., durchges. Aufl. Berlin: Beuth, 2007. Maschinenbau. ISBN 9783410165187

- [60] DOLEZILEK, D., D. GAMMEL und W. FERNANDES. Cyber-security based on IEC 62351 and IEC 62443 for IEC 61850 systems. In: *15th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2020)*: Institution of Engineering and Technology, 2020, 6 pp-6 pp. ISBN 978-1-83953-277-1
- [61] KUBACH, U. Device Clouds: Cloud-Plattformen schlagen die Brücke zwischen Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge. In: *Handbuch Industrie 4.0 Bd.3*: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 181-200
- [62] OPC FOUNDATION. *Connecting Your OPC UA Data Sources to the Cloud – OPC Connect* [online]. 18 Juni 2022 [Zugriff am: 18. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://opcconnect.opcfoundation.org/2020/09/connecting-your-opc-ua-data-sources-to-the-cloud/>
- [63] LIES, J. Definition: Unternehmenskultur [online]. *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 14. Februar 2018. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/unternehmenskultur-49642>
- [64] ERNST, H. Unternehmenskultur und Innovationserfolg — Eine empirische Analyse [online]. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 2003, 55(1), S. 23-44. ISSN 0341-2687. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF03372697
- [65] CAMERON, K.S. und S.J. FREEMAN. Cultural congruence, strength, and type: relationships to effectiveness. *Research in Organizational Change and Development*, 1991, (5), S. 23-58
- [66] JEBERIEN, B., M. STEPHAN und M. SCHNEIDER. *Management von Ideen: Stand in der Praxis Ergebnisse einer empirischen Untersuchung im deutschsprachigen Raum in Zusammenarbeit mit der IHK Innovations- und Technologieberatung*. Discussion Papers on Strategy and Innovation, 2013
- [67] GILLENKIRCH, R. Definition: Entscheidung [online]. *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 19. Februar 2018 [Zugriff am: 19. März 2022]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/entscheidung-36360>
- [68] KAHNEMAN, D. *Thinking, Fast and Slow*. [S.I.]: Farrar, Straus and Giroux, 2011. ISBN 978-1-4299-6935-2

- [69] GLADWELL, M. *Outliers. The story of success*. 2nd ebook ed. New York: Back Bay Books, 2011. ISBN 9780316040341
- [70] BETSCH, T. *Denken - Urteilen, Entscheiden, Problemlösen: allgemeine Psychologie für Bachelor*: Springer, 2010. ISBN 3-642-12473-9
- [71] BURGHARDT, M. *Projektmanagement. Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten*. 10., überarbeitete und erweiterte Auflage. Erlangen: Publicis Publishing, 2018. ISBN 3895789593
- [72] KNIGHT, F.H. *Risk, uncertainty and profit*. Boston: Houghton Mifflin, 1921. 31
- [73] CAMERER, C. und M. WEBER. Recent developments in modeling preferences: Uncertainty and ambiguity [online]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4), S. 325-370. ISSN 0895-5646. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF00122575
- [74] CHUI, M., et al. The social economy: Unlocking value and productivity through social technologies [online]. *McKinsey & Company*, 1. Juli 2012 [Zugriff am: 20. März 2022]. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/the-social-economy>
- [75] ENRIQUEZ, J.G., A. JIMENEZ-RAMIREZ, F.J. DOMINGUEZ-MAYO und J.A. GARCIA-GARCIA. Robotic Process Automation: A Scientific and Industrial Systematic Mapping Study [online]. *IEEE Access*, 2020, 8, S. 39113-39129. Verfügbar unter: doi:10.1109/ACCESS.2020.2974934
- [76] BLUM, P. und M. DÜBNER. Betriebliche Bildung 3.0-Wie sieht sie aus-was muss sie leisten. *eLearning Journal*, 2012, 14(2012), S. 42-47
- [77] NONAKA, I. The Knowledge-Creating Company. In: *The Economic Impact of Knowledge*: Elsevier, 1998, S. 175-187
- [78] CSIKSZENTMIHALYI, M. *Flow im Beruf. Das Geheimnis des Glücks am Arbeitsplatz*: Klett-Cotta, 2004. ISBN 9783608935325
- [79] PÖPPEL, E. und B. WAGNER. *Von Natur aus kreativ. Die Potenziale des Gehirns entfalten*: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012. ISBN 9783446432864

- [80] ANKE, S. und T. RINGEISEN. Kompetenzanforderungen an Führungskräfte von agilen Softwareentwicklungsteams [online]. *Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO)*, 2021, **52**(1), S. 51-63. ISSN 2366-6145. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11612-021-00558-w
- [81] SELLEN, A.J. und R. HARPER. *The myth of the paperless office*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2003. ISBN 0262194643
- [82] HAMEL, G. Moon shots for management. *Harvard Business Review*, 2009, **87**(2), S. 91-98
- [83] EBERT, H., Hg. *Sprache und Dialog als Führungsinstrumente*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. ISBN 978-3-658-16775-2
- [84] LALOUX, F. *Reinventing Organizations. Ein Leitfaden zur Gestaltung sinnstiftender Formen der Zusammenarbeit*: Vahlen, 2015. ISBN 9783800649143
- [85] MILLING, P. *Systemtheoretische Grundlagen zur Planung der Unternehmenspolitik*. Berlin: Duncker & Humblot, 1981. ISBN 3-428-04931-4
- [86] EBERHARD FEESS. Definition: Komplexität [online]. *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 19. Februar 2018 [Zugriff am: 18. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/komplexitaet-39259>
- [87] SCHOENEBERG, K.-P. Komplexität - Eine Einführung in die Komplexitätsforschung und Auswirkungen auf das Management komplexer Projekte. In: H. LOOCK und H. STEPPELER, Hg. *Marktorientierte Problemlösungen im Innovationsmarketing*. Wiesbaden: Gabler, 2010, S. 479-500. ISBN 978-3-8349-2480-3
- [88] MACK, O., A. KHARE, A. KRÄMER und T. BURGARTZ. *Managing in a VUCA world*. Cham: Springer, 2016. ISBN 3-319-16888-6
- [89] SCHUH, G. *Produktkomplexität managen: Strategien-Methoden-Tools*: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014
- [90] PETERS, T.J. und R.H. WATERMAN. *Auf der Suche nach Spitzenleistungen. Was man von den bestgeführten US-Unternehmen lernen kann*. 9. Aufl. Frankfurt am Main: Redline Wirtschaft bei Verl. Moderne Industrie, 2003. ISBN 3478813107

- [91] SCHOENEBERG, K.-P. *Komplexitätsmanagement in Unternehmen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN 978-3-658-01283-0
- [92] LATOUR, B. On actor-network theory: A few clarifications. *Soziale welt*, 1996, S. 369-381
- [93] FREEMAN, R.E. *Strategic management. A stakeholder approach*. [Nachdr.]. Boston, Mass.: Pitman, 1984. Pitman series in business and public policy. ISBN 0273019139
- [94] CLARKSON, M.E. A Stakeholder Framework for Analyzing and Evaluating Corporate Social Performance [online]. *Academy of Management Review*, 1995, 20(1), S. 92-117. ISSN 0363-7425. Verfügbar unter: doi:10.5465/amr.1995.9503271994
- [95] MITCHELL, R.K., B.R. AGLE und D.J. WOOD. Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience: Defining the Principle of Who and What Really Counts [online]. *Academy of Management Review*, 1997, 22(4), S. 853. ISSN 0363-7425. Verfügbar unter: doi:10.2307/259247
- [96] DONALDSON, T. und L.E. PRESTON. The Stakeholder Theory of the Corporation: Concepts, Evidence, and Implications [online]. *Academy of Management Review*, 1995, 20(1), S. 65. ISSN 0363-7425. Verfügbar unter: doi:10.2307/258887
- [97] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 69901-5, *Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [98] SOFTWARE & SYSTEMS ENGINEERING STANDARDS COMMITTEE OF THE IEEE COMPUTER SOCIETY. ISO/IEC/IEEE 42010:2011(E), Systems and software engineering — Architecture description
- [99] POLONSKY, M. Stakeholder management and the stakeholder matrix: Potential strategic marketing tools [online]. *Journal of Market-Focused Management*, 1996, 1(3). ISSN 1382-3019. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF00190039
- [100] BENJAMIN L. CROSBY. Stakeholder Analysis: A Vital Tool for Strategic Managers. In: , 1993

- [101] ROWLEY, T.J. Moving beyond Dyadic Ties: A Network Theory of Stakeholder Influences [online]. *Academy of Management Review*, 1997, 22(4), S. 887. ISSN 0363-7425. Verfügbar unter: doi:10.2307/259248
- [102] CONWAY, M.E. How do committees invent. *Datamation*, 1968, 14(4), S. 28-31
- [103] HUTZSCHENREUTER, T. *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Grundlagen mit zahlreichen Praxisbeispielen*. 6., überarb. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015. Springer eBook Collection. ISBN 3658085630
- [104] BURKHARDT KREMS. *Sach- und Formalziel(e)* [online]. 21 Mai 2012 [Zugriff am: 28. Januar 2022]. Verfügbar unter: <https://olev.de/s/sachziel.htm>
- [105] ERLÉN, B. und A.J. ISAAK. *BWL-Kennzahlen. = Business ratios : [Deutsch - Englisch, German - English]*. Weinheim: Wiley-VCH, 2015. ISBN 3527507574
- [106] DORAN, G.T. und OTHERS. There's a SMART way to write management's goals and objectives. *Management review*, 1981, 70(11), S. 35-36
- [107] JOHN, W. *Coaching for performance*. Gramedia Pustaka Indonesia, Jakarta, 1997
- [108] GLADEN, W. *Kennzahlen- und Berichtssysteme. Grundlagen zum Performance Measurement*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2001. ISBN 9783409118286
- [109] KLESSE, P. Was ist Hoshin Kanri? In: *Best Practice im Vertrieb durch Hoshin Kanri: Mit der japanischen Management-Methode zum nachhaltigen Vertriebs Erfolg*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 1-4. ISBN 978-3-658-27554-9
- [110] STRATHERN, M. 'Improving ratings': audit in the British University system [online]. *European Review*, 1997, 5(3), S. 305-321. ISSN 10627987. Verfügbar unter: doi:10.1002/(SICI)1234-981X(199707)5:3<305::AID-EURO184>3.0.CO;2-4
- [111] ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIK-INDUSTRIE. *ZVEI-Kennzahlensystem: Ein Instrument zur Unternehmenssteuerung*. 4. Auflage. Frankfurt am Main: Sachon, 1989

- [112] KAPLAN, R.S., D.P. NORTON und OTHERS. The balanced scorecard: measures that drive performance. *Harvard Business Review*, 2005, **83**(7), S. 172
- [113] SYRING, M.C. *Performance-Messung und -Management von Kennzahlen- und Informationssystemen*. Zugl.: Tübingen, Univ., Diss., 2008. Aachen: Shaker, 2008. Berichte aus der Betriebswirtschaft. ISBN 9783832273606
- [114] RIECK, C. *Spieltheorie. Eine Einführung*. 17. korrigierte Auflage. Eschborn: Christian Rieck Verlag, 2021. ISBN 9783924043919
- [115] HUNGENBERG, H. *Strategisches Management in Unternehmen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN 978-3-658-06680-2
- [116] MINTZBERG, H. The Strategy Concept I: Five Ps for Strategy [online]. *California Management Review*, 1987, **30**(1), S. 11-24. ISSN 0008-1256. Verfügbar unter: doi:10.2307/41165263
- [117] MINTZBERG, H. und J.A. WATERS. Of strategies, deliberate and emergent [online]. *Strategic Management Journal*, 1985, **6**(3), S. 257-272. ISSN 01432095. Verfügbar unter: doi:10.1002/smj.4250060306
- [118] KAUMANN, R. und V. SIEGENHEIM. APPLE. GOOGLE. FACEBOOK. AMAZON. [online]. Strategien und Geschäftsmodelle einfach auf den Punkt gebracht. *Digitalkompakt LfM*, 2012, (5). Verfügbar unter: https://www.medienanstalt-nrw.de/fileadmin/lfm-nrw/nrw_digital/DK_Apple_Google_Facebook_Amazon.pdf
- [119] NORDSIECK, F. *Grundlagen der Organisationslehre; mit zahlreichen Schaubildern*: Poeschel, 1934
- [120] STEINMANN, H., G. SCHREYÖGG und J. KOCH. *Management. Grundlagen der Unternehmensführung ; Konzepte, Funktionen, Fallstudien*. 6., vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2005. Gabler-Lehrbuch. ISBN 9783409633123
- [121] LIPPOLD, D. *Organisationsstrukturen von Stabsfunktionen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. ISBN 978-3-658-12661-2

- [122] FRESE, E., M. GRAUMANN und L. THEUVSEN. *Grundlagen der Organisation. Entscheidungsorientiertes Konzept der Organisationsgestaltung*. 10., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2012. ISBN 9783834930293
- [123] VAHS, D. *Organisation. Ein Lehr- und Managementbuch*. 8., überarbeitete und erweiterte Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2012. ISBN 9783791031743
- [124] SCHEWE, G. Definition: Mehrliniensystem [online]. *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 14. Februar 2018 [Zugriff am: 6. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/mehrliniensystem-41223/version-264592>
- [125] FRANZ-RUDOLF, E. Definition: Community [online]. *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 16. Februar 2018 [Zugriff am: 29. Januar 2022]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/community-51940>
- [126] GÖTZ, J. *Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2015. Bamberg: Meisenbach, 2015. Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. 265. ISBN 9783875253863
- [127] ALPHABET INVESTOR RELATIONS. *Alphabet Investor Relations* [online]. 27 Januar 2022 [Zugriff am: 29. Januar 2022]. Verfügbar unter: <https://abc.xyz/investor/founders-letters/2004-ipo-letter/>
- [128] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN EN ISO 9000, Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [129] BERGMANN, R. und M. GARRECHT. *Organisation und Projektmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. ISBN 978-3-662-63753-1
- [130] SCHEER, A.-W. *Architektur integrierter Informationssysteme. Grundlagen der Unternehmensmodellierung*. 2., verb. Aufl. Berlin: Springer, 1992. ISBN 3540554017
- [131] JOHANSSON, H.J., Hg. *Business process reengineering. Breakpoint strategies for market dominance*. Reprinted. Chichester: Wiley, 1994. ISBN 0471950882

- [132] DAHM, M.H. *Lean Management und Six Sigma. Qualität und Wirtschaftlichkeit in der Wettbewerbsstrategie*. 3., neu bearbeitete und wesentlich erweiterte Auflage. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2015. ISBN 9783503156351
- [133] Verein Deutscher Ingenieure e.V. 5200:2011-02: 2011, *Fabrikplanung - Planungsvorgehen Blatt 1*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [134] FELDMANN, K., T. SCHMUCK, M. BROSSOG und J. DREYER. Beschreibungsmodell zur Planung von Produktionssystemen. Entwicklung eines Beschreibungsmodells für Produkte, Prozesse und Ressourcen zur rechnergestützten Planung produktionstechnischer Systeme. *wt Werkstattstechnik online*, 2008, **98**(3), S. 156-162
- [135] BIOVIA, D.S. *DELMIA* [online]. 31 Januar 2022 [Zugriff am: 1. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.3ds.com/products-services/delmia/>
- [136] SIEMENS DIGITAL INDUSTRIES SOFTWARE. *Manufacturing BOM/BOP Management | Siemens Software* [online]. 23 April 2020 [Zugriff am: 1. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/collaboration/manufacturing-bom-bop-management.html>
- [137] CHUNG, Y. und G.W. FISCHER. A conceptual structure and issues for an object-oriented bill of materials (BOM) data model [online]. *Computers & Industrial Engineering*, 1994, **26**(2), S. 321-339. ISSN 0360-8352. Verfügbar unter: doi:10.1016/0360-8352(94)90065-5
- [138] NEUHÄUSER, T., Q. CHEN, M. RÖSCH, A. HOHMANN und G. REINHART. Building Information Modeling im Fabriklebenszyklus [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2020, **115**(s1), S. 66-69. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.112331
- [139] KARL KURBEL. *MRP II* [online]. 1 Februar 2022 [Zugriff am: 1. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/Sektor-spezifische-Anwendungssysteme/MRP-II/index.html>
- [140] WIGHT, O.W. *Manufacturing resource planning. MRP II ; unlocking America's productivity potential*. Rev. ed. Essex Junction, VT: Wight, 1984. ISBN 0939246031

- [141] PIONTEK, J. *Produktion*. Stuttgart: Kohlhammer, 2002. 9. ISBN 3170167057
- [142] REFA - VERBAND FÜR ARBEITSGESTALTUNG, BETRIEBSORGANISATION UND UNTERNEHMENSENTWICKLUNG. *Industrial Engineering. Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung*. 2. Auflage. München: Hanser; Ciando, 2016. REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung. ISBN 978-3-446-44786-8
- [143] TOBON-VALENCIA, E., S. LAMOURI, R. PELLERIN und A. MOEUF. Modeling of the Master Production Schedule for the Digital Transition of Manufacturing SMEs in the Context of Industry 4.0 [online]. *Sustainability*, 2022, **14**(19), S. 12562. Verfügbar unter: doi:10.3390/su141912562
- [144] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 69901-5, *Statistik und Zertifizierungsgrundlagen: Projektmanagement-Projektmanagementsysteme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [145] SEIDL, J. *Multiprojektmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-16722-5
- [146] AHLEMANN, F. *Das M-Modell. Eine konzeptionelle Informations-systemarchitektur für die Planung, Kontrolle und Koordination von Projekten (Project-Controlling)*. Osnabrück: Univ, 2003. Arbeitsbericht des Fachgebiets Betriebswirtschaftslehre/Organisation und Wirtschaftsinformatik, Universität Osnabrück. ISBN 3936475032
- [147] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 69901-2, *Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 2: Prozesse, Prozessmodell*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [148] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. *A guide to the project management body of knowledge. (PMBOK guide)*. 5. Aufl. Newtown Square, PA: PMI, 2013. ISBN 978-1935589679
- [149] AXELOS LIMITED. *Erfolgreiche Projekte managen mit PRINCE2*. Dritte Auflage. London: TSO, 2014. ISBN 978-0-11-331214-6
- [150] BUNDESVERWALTUNGSAMT. *Festlegung und Überprüfung der Projektorganisation* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2021]. Verfügbar unter: https://www.bva.bund.de/DE/Services/Behoerden/Beratung/Beratungszentrum/GrossPM/s-o-s_handbuch/stda_sos-kap3_projektorganisation.html

- [151] WETTERNEY, T.I. *DISRUPTIONSORIENTIERTER SPEZIFIKATIONSPROZESS TECHNISCHER SYSTEME*. [S.l.]: APPRIMUS WISSENSCHAFTSVER, 2020. ISBN 978-3-86359-877-8
- [152] KAGERMANN, H., W. WAHLSTER und J. HELBIG. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. [online], 2013. Verfügbar unter: <https://www.acatech.de/publikation/umsetzungsempfehlungen-fuer-das-zukunftsprojekt-industrie-4-0-abschlussbericht-des-arbeitskreises-industrie-4-0/>
- [153] FRANK, H., R. ANDERL, G. MAHBOBI, J. STELTER, H. SCHÖNING, S. PETERS und R. JORDAN. *Generisches Vorgehensmodell zur Einführung von Industrie 4.0 in mittelständischen Unternehmen der Serienfertigung*. [online]. Abschlussbericht des Fachgebietes Datenverarbeitung in der Konstruktion des Projektes CypIFlex, 2015. 2015 [Zugriff am: 22. Mai 2021]
- [154] ANDERL, R. und J. FLEISCHER. *Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*. Frankfurt: VDMA, 2015
- [155] WEINERT, N., M. PLANK und A. ULLRICH. *Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-662-54316-0
- [156] LANZA, G. und P. NYHUIS, Hg. *Industrie 4.0 für die Praxis. Befähigungs- und Einführungsstrategien*. Garbsen: TEWISS Verlag TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2018. Berichte aus dem IFA. ISBN 978-3-95900-224-0
- [157] LIEBRECHT, C. und A. KUHNLE. *Industrie 4.0-Methodentoolbox* [online]. 23 November 2021 [Zugriff am: 23. November 2021]. Verfügbar unter: <http://www.intro40-webtools.de/?p=toolbox>
- [158] LIEBRECHT, C. *Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz – Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen*: Karlsruhe, 2020
- [159] CALÀ, A. *A novel migration approach towards decentralized automation in cyber-physical production systems*: Otto von Guericke University Library, Magdeburg, Germany, 2019
- [160] KRÜGER, J. und A. VERL. *RetroNet – Retrofitting von Maschinen und Anlagen für die Vernetzung mit Industrie 4.0 Technologie*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2019. Fertigungstechnik. 700. ISBN 9783183700028

- [161] SEE, B. von. *Ein Handlungsrahmen für die digitale Transformation in Wertschöpfungsnetzwerken*, 2019
- [162] SCHUH, G., R. ANDERL, J. GAUSEMEIER, M. ten HOMPEL und W. WAHLSTER. *Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten* [online], 2020. Verfügbar unter: <https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/>
- [163] MELZER, A. *Six Sigma - Kompakt und praxisnah*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 978-3-658-09853-7
- [164] BETTINA BEER. „Methode“, „Methodik“ und „Methodologie“ in der Ethnologie. *Ethno Scripts*, 2008, **10**(2), S. 8-23
- [165] JENKE, K. *Konzept zur Lösung technischer Qualitätsprobleme in der Produktion durch Anwendung der Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ)*. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2006. Als Ms. gedr. Kaiserslautern: Techn. Univ., 2007. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK. 2007,1. ISBN 3939432296
- [166] REY, J. *Methodik zur hochiterativen Gestaltung von Fertigungsprozessfolgen*. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2020. ISBN 978-3-86359-885-3
- [167] RODERBURG, A. *Methodik zur Entwicklung von hybriden Fertigungstechnologien*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss, 2013. Aachen: Apprimus-Verl., 2013. Technologie der Fertigungsverfahren. 2013,24. ISBN 978-3-86359-166-3
- [168] STAUDER, J.M.J. *Anlauforientierte Gestaltung von Fertigungssystemen*. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2017. ISBN 9783863595203
- [169] MOHR, A., M. WOHLRAB-SAHR und A. PRZYBORSKI. *Qualitative Sozialforschung*: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2014. ISBN 978-3-486-70892-9
- [170] LIENERT, G.A. und U. RAATZ. *Testaufbau und Testanalyse*. 6. Aufl. Weinheim: Beltz, 1998. Grundlagen Psychologie. ISBN 978-3-621-27845-4
- [171] DOERR, J. *OKR. Objectives & Key Results : wie Sie Ziele, auf die es wirklich ankommt, entwickeln, messen und umsetzen*. München: Verlag Franz Vahlen GmbH, 2018. Vahlen eLibrary Unternehmensführung, Management, Organisation. ISBN 9783800657742

- [172] ROTHER, M., J. SHOOK, B. WIEGAND, J.P. WOMACK und D.T. JONES. *Sehen lernen. Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen*. Mühlheim an der Ruhr: Lean Management Institut, Oktober 2018. Workbooks für Lean-Management. ISBN 978-3-9809521-1-8
- [173] PORTER, M.E. *Competitive strategy. Techniques for analyzing industries and competitors : with a new introduction*. New York: Free Press, 1998. ISBN 0-684-84148-7
- [174] FAHEY, L. und V.K. NARAYANAN. *Macroenvironmental analysis for strategic management*. St. Paul: West Publ. Comp, 1986. West series in strategic management. ISBN 0314852336
- [175] KOTLER, P., R. BERGER und N. BICKHOFF. *The Quintessence of Strategic Management. What You Really Need to Know to Survive in Business*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 3642145434
- [176] TAFVIZI ZAVAREH, M. und M. EIGNER. Determination of engineering digitalization maturity [online]. *Proceedings of the Design Society*, 2021, 1, S. 1193-1202. Verfügbar unter: doi:10.1017/pds.2021.119
- [177] STOCK, P. und K. BOGUS. REFA Checkliste-Industrie-4.0 [online]. Ganzheitliche Gestaltung als Basis der Industrie 4.0, 2018. Verfügbar unter: https://refa-institut.de/wp-content/uploads/2019/02/REFA_Checkliste-Industrie-4.0_interaktiv.pdf
- [178] WEBER, M.-A., S. TERSTEGEN und F. LENNINGS. *Checkliste Digitalisierung & Industrie 4.0 in der Praxis. Geschäftsstrategie und Prozesse ganzheitlich gestalten*. Bergisch Gladbach: Heider Druck GmbH, 2017
- [179] PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. *Industrie 4.0 Landkarte* [online] [Zugriff am: 9. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Angebote-Ergebnisse/Industrie-4-0-Landkarte/industrie-4-0-landkarte.html>
- [180] ARDILIO, A. Fraunhofer Technologieradar: Trends erkennen – Technologien umsetzen. In: H.-J. BULLINGER, Hg. *Fokus Technologiemarkt. Technologiepotenziale identifizieren – Marktchancen realisieren*. München: Hanser, 2012, S. 61-74. ISBN 978-3-446-43323-6

- [181] LEWIN, M. Technologieradar zur durchgängigen Datennutzung [online]. Verfügbar unter: https://www.kompetenzzentrum-hamburg.digital/images/angebot/technologieradar/technologie_radar_datendurchgaengigkeit_180628.pdf
- [182] OLEGHE, O. und K. SALONITIS. Leanness Assessment Tools and Frameworks. In: J.P. DAVIM, Hg. *Progress in Lean Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 1-37. ISBN 978-3-319-73647-1
- [183] BORG, I. *Führungsinstrument Mitarbeiterbefragung. Theorien, Tools und Praxiserfahrungen*. 3., überarb. und erw. Aufl. Göttingen: Hogrefe Verl. für Psychologie, 2003. Schriftenreihe Wirtschaftspsychologie. ISBN 3-8017-1716-X
- [184] VAN DER AALST, W., et al. Process Mining Manifesto. In: F. DANIEL, K. BARKAOUI und S. DUSTDAR, Hg. *Business Process Management Workshops. BPM 2011 International Workshops, Clermont-Ferrand, France, August 29, 2011, Revised Selected Papers, Part I*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 169-194. ISBN 978-3-642-28107-5
- [185] BROWN, J. *The World Café. Shaping Our Futures Through Conversations That Matter*. Oakland: Berrett-Koehler Publishers Incorporated, 2005. ISBN 9781605092515
- [186] OWEN, H. *Open space technology. Ein Leitfaden für die Praxis*. Stuttgart: Klett-Cotta; Schäffer-Poeschel, 2001. ISBN 3608940111
- [187] BROWN, T. Design thinking. *Harvard Business Review*, 2008, **86**(6), S. 84
- [188] KOSTKA, C. und S. KOSTKA. *Der kontinuierliche Verbesserungsprozess. Methoden des KVP*. 3., völlig Neubearb. Aufl. München: Hanser, 2007. Pocket-Power. 22. ISBN 3-446-40736-7
- [189] SABINE FISCHER. *Die Zeitgenössische Verwendung des Begriffs Idee, die sprachliche Gestaltung von Ideen und ihr semantisches Optimierungspotential*. Doctoralthesis, 2012
- [190] KRECHEL, T. *Ein Kompass für Innovationen - Teil 3* [online], 2021. 23 September 2021 [Zugriff am: 7. April 2023]. Verfügbar unter: <https://www.tarent.de/blog/innovationskompass-teil-3>
- [191] TZINIS, I. Technology Readiness Level [online]. NASA, 6. Mai 2015 [Zugriff am: 7. April 2023]. Verfügbar unter:

- https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level
- [192] DOMBROWSKI, U. und T. WAGNER. Arbeitsbedingungen im Wandel der Industrie 4.0 [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2014, **109**(5), S. 351-355. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.111149
- [193] ZAKI, M.J., M. PETERS, I. ASSENT und T. SEIDL. Clicks: An effective algorithm for mining subspace clusters in categorical datasets [online]. *Data & Knowledge Engineering*, 2007, **60**(1), S. 51-70. ISSN 0169023X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.datak.2006.01.005
- [194] MCPEEK, M.A., et al. The Golden Rule of Reviewing [online]. *The American Naturalist*, 2009, **173**(5), S. E155-E158. Verfügbar unter: doi:10.1086/598847
- [195] STILLER-REEVE, M. How to write a thorough peer review [online]. *Nature*, 2018. ISSN 0028-0836. Verfügbar unter: doi:10.1038/d41586-018-06991-0
- [196] BANSE, G. *Nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig! Das Einfachheitsprinzip in den Technikwissenschaften*, 2010. ISBN 978-3-89626-953-9
- [197] WINTER, S. Bewertungskriterien und -verfahren. In: S. WINTER, Hg. *Management von Lieferanteninnovationen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 125-161. ISBN 978-3-658-05100-6
- [198] SARASVATHY, S.D. Causation and Effectuation: Toward a Theoretical Shift from Economic Inevitability to Entrepreneurial Contingency [online]. *Academy of Management Review*, 2001, **26**(2), S. 243-263. ISSN 0363-7425. Verfügbar unter: doi:10.5465/amr.2001.4378020
- [199] WELLMANN, A. und R. ZELMS. Eisenhower-Prinzip. In: A. WELLMANN, Hg. *Professionelles Zeitmanagement. Mit Timer und EDV das Büro Jederzeit Fest Im Griff*. Wiesbaden: Springer Gabler. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1995, S. 75-76. ISBN 9783409199872
- [200] COVEY, S.R. *7 Habits of Highly Effective People. Restoring the Character Ethic*. Online-Ausg. Riverside: RosettaBooks, 2009. EBL-Schweitzer. ISBN 9780795309212

- [201] ELLIS, S. *Hacking Growth. How Today's Fastest-Growing Companies Drive Breakout Success*. Westminster: Crown/Archetype, 2017. ISBN 045149721X
- [202] WARD, J., P. TAYLOR und P. BOND. Evaluation and realisation of IS/IT benefits: an empirical study of current practice [online]. *European Journal of Information Systems*, 1996, 4(4), S. 214-225. ISSN 0960-085X. Verfügbar unter: doi:10.1057/ejis.1996.3
- [203] HANSMANN, K.-W. *Kurzlehrbuch Prognoseverfahren*. Wiesbaden: Springer Gabler. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1983. Gabler Kurzlehrbücher Ser. ISBN 978-3-663-06906-5
- [204] GROCHLA, E. *Grundlagen der organisatorischen Gestaltung*. Stuttgart: Poeschel, 1982. Sammlung Poeschel. 100. ISBN 3791091182
- [205] KRUCHTEN, P.B. The 4+1 View Model of architecture [online]. *IEEE Software*, 1995, 12(6), S. 42-50. ISSN 07407459. Verfügbar unter: doi:10.1109/52.469759
- [206] LIDDLE, S.W. Model-Driven Software Development. In: D.W. EMBLEY und B. THALHEIM, Hg. *Handbook of Conceptual Modeling*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 17-54. ISBN 978-3-642-15864-3
- [207] IEEE Standards Association. IEEE 1016, *IEEE Standard for Information Technology - Systems Design - Software Design Descriptions*. Piscataway, NJ, USA: IEEE
- [208] JOHANNING, V. *IT-Strategie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN 978-3-658-02048-4
- [209] KAMPKER, A., M. KRUNKE, K. KREISKÖTHER, H. VOET, M. DANNAPFEL und P. BURGGRÄF. Das Aachener Fabrikplanungsverfahren - Agile Fabrikplanung im turbulenten Umfeld. *wt Werkstattstechnik online*, 2014, 104, S. 192-196
- [210] WILDEMANN, H. *Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung*, 1998
- [211] WARNECKE, H.-J. *Die Fraktale Fabrik. Revolution der Unternehmenskultur*. Neuaufl. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 1996. rororo science. 9708. ISBN 3499197081

- [212] WIENDAHL, H.-P., J. REICHARDT und P. NYHUIS. *Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2009. ISBN 3446224777
- [213] SJAROV, M., D. KIßKALT, T. LECHLER, A. SELMAIER und J. FRANKE. Towards “Design for Interoperability” in the context of Systems Engineering [online]. *Procedia CIRP*, 2021, **96**, S. 145-150. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2021.01.067
- [214] KELLER, G., M. NÜTTGENS und A.W. SCHEER. *Semantische Prozessmodellierung auf der Grundlage "ereignisgesteuerter Prozessketten (EPK)*: Inst. für Wirtschaftsinformatik, 1992. Institut für Wirtschaftsinformatik Saarbrücken: Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik
- [215] SEIDLMEIER, H. *Prozessmodellierung mit ARIS®. Eine beispielorientierte Einführung für Studium und Praxis in ARIS 10*. 5., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. Springer eBook Collection. ISBN 9783658259570
- [216] BÖHMANN, T. und H. KRCMAR. Modulare Servicearchitekturen. In: H.-J. BULLINGER und A.-W. SCHEER, Hg. *Service Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, S. 391-415. ISBN 978-3-662-09872-1
- [217] EBEL, N. *Basiswissen ITIL® 2011 Edition. Grundlagen und Know-how für das IT Service Management und die ITIL®-Foundation-Prüfung*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2015. Ebookcentral. ISBN 9783864916069
- [218] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 61508, *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [219] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN ISO 6385, *Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [220] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 69900, *Projektmanagement - Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [221] BURGGRÄF, P. und G. SCHUH. *Fabrikplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. ISBN 978-3-662-61968-1

- [222] IEEE Computer Society/Software & Systems Engineering Standards Committee. ISO/IEC/IEEE 29148, *Systems and software engineering - Life cycle processes - Requirements engineering*
- [223] ROSENSTIEL, L. von. *Grundlagen der Organisationspsychologie. Basiswissen und Anwendungshinweise*. 5., überarb. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2003. Sammlung Poeschel. 95. ISBN 3791092367
- [224] SKELTON, M. und M. PAIS. *Team topologies. Organizing business and technology teams for fast flow*. Portland, Oregon: IT Revolution, 2019. ISBN 978-1942788812
- [225] STACEY, R.D. *Complexity and creativity in organizations*: Berrett-Koehler Publishers, 1996. ISBN 1881052893
- [226] DÖRNER, D. *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. 2. Auflage: Kohlhammer Verlag Stuttgart, 1979. ISBN 978-3170055179
- [227] SJOBERG, D.I., A. JOHNSEN und J. SOLBERG. Quantifying the Effect of Using Kanban versus Scrum: A Case Study [online]. *IEEE Software*, 2012, 29(5), S. 47-53. ISSN 07407459. Verfügbar unter: doi:10.1109/MS.2012.110
- [228] HALSTENBERG, J., B. PFITZINGER und T. JESTÄDT. *DevOps*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. ISBN 978-3-658-31404-0
- [229] PIERRE CARBONNELLE. *TOP IDE Top Integrated Development Environment index* [online]. 1 Juli 2022 [Zugriff am: 23. Juli 2022]. Verfügbar unter: <https://pypl.github.io/IDE.html>
- [230] PIERRE CARBONNELLE. *TOP ODE Top Online Development Environment index* [online]. 1 Juli 2022 [Zugriff am: 23. Juli 2022]. Verfügbar unter: <https://pypl.github.io/ODE.html>
- [231] ELLIS, A. und M. KAUFERSTEIN. *Dienstleistungsmanagement. Erfolgreicher Einsatz von prozessorientiertem Service Level Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. Springer eBook Collection Business and Economics. ISBN 9783642170072
- [232] BRUGGER, R. *Der IT-Business-Case. Kosten erfassen und analysieren - Nutzen erkennen und quantifizieren - Wirtschaftlichkeit nachweisen und realisieren*. [Online-ausg.]. Berlin [u.a.]: Springer, 2005. Xpert.press. ISBN 3-540-23203-6

- [233] NEUMANN, R., W. GRILLITSCH und A. MÜLLER-STINGL. *Best Practices und Lessons Learned aus Wissensmanagement-Initiativen*, 2007
- [234] DOMINIK KISSKALT. CoMoRes - Entwicklung eines Condition Monitoring Systems zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz von Fräs-Dreh-Zentren [online], 2019. Verfügbar unter: https://www.faps.fau.de/wp-content/uploads/2019/05/GFB_CoMoRes.pdf
- [235] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG. Strategie Künstliche Intelligenz der Bundesregierung. Fortschreibung, Berlin, 2020
- [236] ZORPETTE, G. GPT-4 and the Hunt for Superintelligence [online]. *IEEE Spectrum*, 19. April 2023 [Zugriff am: 12. Mai 2023]. Verfügbar unter: <https://spectrum.ieee.org/superintelligence-christoph-koch-gpt4>
- [237] SMITH, C.S. Coding Made AI—Now How Will AI Unmake Coding? [online]. *IEEE Spectrum*, 19. September 2022 [Zugriff am: 12. Mai 2023]. Verfügbar unter: <https://spectrum.ieee.org/ai-code-generation-language-models#toggle-gdpr>
- [238] HENSEL, M. Siemens und Microsoft setzen auf generative KI [online]. *BigData-Insider*, 2. Mai 2023 [Zugriff am: 15. Mai 2023]. Verfügbar unter: <https://www.bigdata-insider.de/siemens-und-microsoft-setzen-auf-generative-ki-a-e24fac718478b2a2b77ec8fb1f6c7110/>

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] LECHLER, T., et al. Introduction of a comprehensive Structure Model for the Digital Twin in Manufacturing. In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*: IEEE, 8. September 2020 - 11. September 2020, S. 1773-1780. ISBN 978-1-7281-8956-7
- [P2] SJAROV, M., et al. The Digital Twin Concept in Industry – A Review and Systematization. In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*: IEEE, 8. September 2020 - 11. September 2020, S. 1789-1796. ISBN 978-1-7281-8956-7
- [P3] SELMAIER, A., B. MARTENS, M. SJAROV, M. KUHN, M. HERBERT und J. FRANKE. Systematische Methodenauswahl bei der Digitalisierung. Anwendung etablierter Vorgehensweisen der Softwareentwicklung in der produzierenden Industrie. *wt - Werkstattstechnik online*, 2020, **110**(4), S. 226-230
- [P4] SELMAIER, A., B. LUTZ, D. KISSKALT, S. BORNICKE, J. FÜRST und J. FRANKE. Semantic Segmentation of Multi-Channel Polycrystalline Structure Micrographs Using Convolutional Neural Networks. In: *2021 20th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*: IEEE, 13. Dezember 2021 - 16. Dezember 2021, S. 847-852. ISBN 978-1-6654-4337-1
- [P5] SELMAIER, A., D. KUNZ, D. KISSKALT, M. BENAZIZ, J. FÜRST und J. FRANKE. Artificial Intelligence-Based Assistance System for Visual Inspection of X-ray Scatter Grids [online]. *Sensors*, 2022, **22**(3), S. 811. Verfügbar unter: doi:10.3390/s22030811
- [P6] SELMAIER, A., M. SJAROV, M. HERBERT, J. DISTLER, J. FÜRST und J. FRANKE. Digital twin-based real time representation of production facilities. In: J. FRANKE und P. SCHUDERER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2021. ISBN 9783736974791

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten

- [S1] KOCH, J. *Konzipierung und Implementierung von I4.0 Komponenten-konformen Anlagenschnittstellen zur Datenbereitstellung*. Masterarbeit. Erlangen, 28. Februar 2019
- [S2] GRÖDEL, E. *Entwicklung und Evaluierung eines standardisierten Vorgehens zur Spezifikation von Anlagenschnittstellen für die Vernetzung von Cyber Physical Systems*. Bachelorarbeit. Erlangen, 30. November 2019
- [S3] GÖRLT, M. *Implementierung und Validierung einer Messsensorik zur Schwingungsüberwachung und -diagnose von Röntgenstrahlern*. Masterarbeit. Erlangen, 8. Februar 2020
- [S4] CLARA, S. *Evaluation von Messsensoren zur Durchführung von Schwingungsanalysen in der Fertigung von Drehanodenröntgenstrahlern*. Bachelorarbeit. Erlangen, 1. August 2020
- [S5] ROBITZCH, P. *Evaluierung und Implementierung maschineller Lernverfahren zur Modellierung von Einflüssen auf die Produkt-/ Prozessqualität von Röntgenstrahlern*. Masterarbeit. Erlangen, 1. Mai 2018
- [S6] MEYER, T. *Konzipierung und Implementierung von fertigungsbeleitenden Qualitätssystemen unter Einbezug maschineller Lernverfahren*. Projektarbeit. Erlangen, 3. Februar 2020
- [S7] MILDE, Y. *Evaluierung und Implementierung statistischer Visualisierungen und maschineller Lernverfahren zur Erkennung und Vorhersage der Produktqualität*. Projektarbeit. Erlangen, 31. Januar 2020
- [S8] DAVID KUNZ. *Development and Evaluation of an Auxiliary System for Optical Part Inspection using Machine Learning*. Masterarbeit. Erlangen, 19. April 2021
- [S9] BÖRNICKE, S. *Konzeption und Implementierung von webbasierten Dashboards zum Echtzeit-Monitoring von Fertigungsanlagen*. Bachelorarbeit. Erlangen, 22. März 2019
- [S10] DAI, S. *Implementation and Integration of a Web Based Condition Monitoring Application for Industrial Production Machines*. Masterarbeit. Erlangen, 1. Mai 2019

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2024):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Heibel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.
1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.
1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.
1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungs- und Fertigungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionsysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG-Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negenandack

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme

FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen

LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.
2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahliefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder.
2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.
2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuer

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit

LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Böning

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Borschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlweißßen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hilderling
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

- Band 306: Sebastian Suttner**
Charakterisierung und Modellierung des Spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.
- Band 307: Bhargav Potdar**
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.
- Band 308: Maria Löffler**
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.
- Band 309: Martin Müller**
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.
- Band 310: Christopher Kästle**
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.
- Band 311: Daniel Vipavc**
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.
- Band 312: Christina Ramer**
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.
- Band 313: Miriam Rauer**
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.
- Band 314: Felix Tenner**
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.
- Band 315: Aarief Syed-Khaja**
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.
- Band 316: Adam Schaub**
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.
- Band 317: Daniel Gröbel**
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.
- Band 318: Philipp Hildenbrand**
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.
- Band 319: Tobias Konrad**
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.
- Band 320: David Meinel**
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.
- Band 321: Andrea Zimmermann**
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.
- Band 322: Christoph Amann**
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.
- Band 323: Jennifer Tenner**
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.
- Band 324: Susan Zöller**
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.
- Band 325: Stefan Lutz**
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.
- Band 326: Tobias Gnibl**
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißschweißprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäfer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugrobotersystem für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungsautomatisierung
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünnschichtiger Verpackungsstähle: Entwicklung einer geeigneten Charakterisierungs- und Validierungsstrategie
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbeeinträchtigte Personen
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel**Lutz**

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehrfach überrollter elasto-plastischer Kontakte
KTmflk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-713-5.

Band 434: Sebastian Wiesemayer

Untersuchungen zur Stoffflusssteuerung beim Fügen durch Umformen von hochfesten Aluminiumlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen
LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-717-3.

Band 436: Martin Roth

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation
KTmflk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-719-7.

Band 437: Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärteprozess durch Verwendung maßgeschneiderter laserimplantierter Werkzeuge
LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-721-0.

Band 438: Andreas Rohrmoser

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaarung Metall-Kunststoff
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-723-4.

Band 439: Andreas Selmaier

DMAICS-Zyklus zur Digitalisierung in produzierenden Unternehmen
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-733-3.

Abstract

Digital technologies from the areas of the internet of things, cyber-physical production systems, cloud and artificial intelligence offer the manufacturing industry new potential for product and process optimization. With digitalization, companies are striving not only to improve the classic target parameters of time, quality and costs, but also to increase flexibility and responsiveness with regard to new business models and external influences. The complete digital transformation in the production environment, which is characterized by a heterogeneous plant and system landscape, requires not only technical but also cultural change. Due to rapidly developing technologies, companies and their employees are required to have a high willingness to change as well as a high ability to adapt and innovate in addition to maintaining the core production processes. Due to this imminent social and technical complexity, the implementation of the digital transformation poses challenges for manufacturing companies. Subject and goal of this thesis is to define a method-based procedure model that can be used to implement the complex transformation process in a comprehensive and application-agnostic manner. The formulation of an integrated process model and its methodical design address the resolution of practical challenges in the field of digitalization. The described solution approach is validated in various industrial application scenarios. The successful implementation of six digital solutions of the technology areas internet of things, data analytics and cloud computing proves the correctness and applicability of the methodology, whose specification creates a foundation for the implementation of information systems, facilitating the digital transformation in manufacturing companies.

Digitale Technologien aus den Bereichen Internet der Dinge, cyber-physische Produktionssysteme, Cloud und künstliche Intelligenz eröffnen der Fertigungsindustrie neue Potenziale zur Produkt- und Prozessoptimierung. Mit der Digitalisierung streben Unternehmen nicht nur danach, die klassischen Zielparameter Zeit, Qualität und Kosten zu verbessern, sondern auch die Flexibilität und Reaktionsfähigkeit im Hinblick auf neue Geschäftsmodelle und externe Einflüsse zu erhöhen. Die vollständige digitale Transformation im Produktionsumfeld, die durch eine heterogene Anlagen- und Systemlandschaft gekennzeichnet ist, erfordert sowohl einen technischen als auch einen kulturellen Wandel. Aufgrund sich rasch entwickelnder Technologien sind Unternehmen und ihre Mitarbeiter neben der Aufrechterhaltung der Kernproduktionsprozesse gefordert, zusätzlich eine hohe Veränderungsbereitschaft sowie die Fähigkeit zur Anpassung und Innovation vorzuweisen. Die inhärente soziale und technische Komplexität der digitalen Transformation stellt die Fertigungsindustrie vor Herausforderungen. Gegenstand und Ziel dieser Arbeit ist es, ein methodenbasiertes Vorgehensmodell zu definieren, das den komplexen Transformationsprozess umfassend und anwendungsagnostisch abbildet. Die Formulierung eines integrierten Prozessmodells und dessen methodische Ausgestaltung zielen auf die Lösung praktischer Problemmerkmale im Bereich der Digitalisierung ab. Der beschriebene Lösungsansatz wird in verschiedenen industriellen Anwendungsszenarien validiert. Die erfolgreiche Realisierung von sechs digitalen Lösungen aus den Technologiebereichen Internet der Dinge, Datenanalyse und Cloud Computing beweist die Richtigkeit und Anwendbarkeit der Methodik, deren Spezifikation eine Implementierungsgrundlage für Informationssysteme zur Digitalisierung von Fertigungsunternehmen schafft.

